

From the scientific editor

(Translation from Russian language)

*(Russian initial text "From the scientific editor" is placed below
Together with the second foreword of author's colleague)*

The widespread use of information flow generation and processing systems, as well as storage, recovery, maintenance and transmission through various communication channels, is the foundation of our technological digital civilization. Its informatization has already reached a very high level and continues to develop intensively.

This monograph presents a complete theory and large-scale, highly intelligent software tools for the study of complex optimization problems, which allowed its author to solve fully the great Shannon's problem posed by him more than seventy years ago, before the future information community in his historical article for the fate of coding theory "Mathematical theory of communication". As the head of a small Russian scientific school of Optimization Theory (OT) of noise-resistant coding, Professor V.V. Zolotarev made, of course, a real scientific feat, solving together with members of his small team really all theoretical problems and preparing the necessary technologies to solve the main applied problem of this science branch, which one is to design and create decoding algorithms for all classical channel models considered by this complex multicomponent theory.

This unusual book is devoted to a simple presentation of all these solutions to the most complex problems in the field of coding theory, as they were evaluated earlier and until today by all experts, considered in the monograph, the author found such convenient, visual and now completely obvious solutions for thinking specialists that all the technical parameters of his algorithms naturally turn out to be the best possible decoding methods for both software and hardware versions of their implementation, up to the channel noise regions close to the Shannon's bound. And we emphasize that, nevertheless, this task in its full scope and to this day remained at our planet absolutely inaccessible to the entire multi-million army of specialists in the field of coding for the past fifty years

However, it is possible to assess the entire philosophical, scientific and technological depth and perfection of the problem solved by the author of this monograph only by understanding the scale of the crisis in which the entire theory of noise-resistant coding has been vegetating for many decades. Therefore, let us first return to the general situation of recent time in this most important branch of science for our digital civilization.

Scientific informatics is developing more and more broad areas of modern digital technologies, and is actively being introduced into various nature monitoring systems. But digital penetration ideology in all aspects of modern life is accompanied by serious crisis phenomena. Moreover, the scale of this crisis in some major segments of information theory has become truly unprecedented, protracted and hopeless.

The main difficulties of computer science have been growing for a long time in the sphere of the very foundations of information theory and in its most complex and, of course, most interesting (!) part, which consists of the theory, technologies and algorithms of noise-resistant coding. Despite the very large number of specialists who seem to be engaged in the development of methods for simple decoding of digital streams in very expensive discrete channels, we can assume that, except for a useful

period of mastering algebraic methods of noise-resistant coding about 60 years ago, all the subsequent half-century, the success of theorists was practically zero. But at the same time, there was just a wave of publications, both in the form of articles and a huge number of monographs, which sometimes stated quite obvious things in their own way, but claimed to make a great contribution to science, although their real the applied results practically did not change anything on the merits of the issue.

The unsolved problems of this main science of the digital world continued to accumulate, which was largely determined then and now by the absolute commitment of a large number of scientists working in this field to the algebraic foundations of this theory. However, in fact, algebraic theory, for many years of its very conditional leadership, has not solved any of the main problems of its development at all: it has not found simple ways to correct errors above the level of half of the code distance, it did not overcome the difficulties of decoding block codes in Gaussian channels, and also did not reach the level of linear complexity of error correction algorithms relatively the codes length, which, of course, slowed down the development of digital technology. Algebraists also had considerable difficulties in analyzing convolutional codes. In addition, their inability for more than half a century to find at least some correction methods for non-binary codes, which would be better than those that were proposed 60 years ago for Reed - Solomon codes (RS), completely dissuaded communication engineers from the possibility of any new results in this cluster of parameters. But this is an extremely important area of application of codes in computing systems, since digital photos, musics and TV use just non-binary, bytearray of information.

Against this background of a clear crisis of theory, the appearance in 1967 of the Viterbi algorithm (VA) for convolutional codes can be considered truly the real salvation of coding theory in its most important application aspect, since the scheme with a formally exponential increase in the decoder's computing volume with the code length provided immediately such high characteristics that were quite sufficient for almost all communication systems for many subsequent decades. However, VA could be implemented both then and now only for short codes.

Recall that the utility of coding, a measure of its effectiveness, for example, in communication technology when transmitting binary data, is usually determined by the energy parameter coding gain (CG), which simply characterizes the magnitude of the apparent increase in the power of the transmitter of a communication system that uses good coding methods and, most importantly, the subsequent highly reliable and fast decoding of the received digital stream.

And since this effect can reach a value of 3, 5, 10 or even more times (more than 10 dB), it becomes clear the exceptional importance of using coding, which simply "gives" to the communication system such a large resource in terms of transmitter power. This large increase in the energy available to signalmen creates an opportunity a significant increase in the speed of digital data transmission, a significant reduction in the size of very expensive antennas, a multiple increase in the communication range and an improvement in the reliability of the received information by many orders of magnitude, as well as a number of other very important advantages of digital communication systems that use noise-resistant coding.

To this we can add the coding needs of completely new areas of development of the digital world. Internet of Things experts will certainly agree that really good coding methods will spend a tiny fraction of the energy of autonomous power sources on correcting possible errors, compared to the case when the codes are not used. And this is just as important as the operation of good decoding algorithms near channel capacity, i.e. at the lowest possible power of the transmitter signal, which also saves a lot of battery power. There are a lot of such useful properties of codes, and all of them are very useful for the entire wide range of coding applications.

Let us further recall that during the half-century complicated period of its relatively active existence, the "classical" coding theory, so to speak, focused in its main applied aspect on the development of coding methods, tried to organize the search for other decoding algorithms, since its successes were extremely insignificant in addition to the exponentially complex VA. Without going into all the minor details of such shifts now directions of development that are now interesting only for historians of science, we will note only some features of such algorithms, which did not become fateful for that theory. All of them are very common in turbo codes, low-density (LDPC) and polar codes. The most inconvenient for all algorithms for decoding these codes it turned out to be necessary to use real numbers in their calculations. This immediately greatly limited the scope of their applicability, especially for high-speed channels. But, moreover, the decision functions of these algorithms, which loaded the processors that implemented such algorithms, turned out to be quite complicated in themselves. And additional high requirements, for example, to the accuracy of calculations of expressions used in decoding polar codes, and in general look like unjustifiably extreme, since in some publications the authors write about the insufficiency for them the usual accuracy of the representation of real numbers in computer systems. And the actual amount of necessary calculations of all these "new" algorithms turned out to be very large.

To this it is necessary to add that, in addition, over the past decades, virtually no author's groups do not bother themselves in such preparation of published materials on decoding algorithms, so that they can be used to get an accurate and — most importantly (!) - correct idea of their complexity, noise immunity and reliability. This completely deprives the readers of such materials of any confidence in the reliability and applicability of these results. Therefore, the decoding algorithms that are actually available to signalmen are often too complex and slow, or weak and not of interest for communication technology.

Translated books, including the educational type, are also verbose and they usually present long-outdated results.

But, as it has been known for more than forty years, the optimal solution (the best result in terms of the probability of an undetected error) for decoding codes can actually be successfully found based on an optimization search at an exponentially growing with the length of the code arrays of possible decisions. This was the starting point of a truly impressive long-term research by the author of this unique monograph, who received the author's certificate for such an unexpected solution to the problem of noise-resistant coding almost half a century ago. And the complexity of this search is the best possible, minimal, growing linearly with the length of the codes, which is also always extremely important.

Numerous works of the author of the monograph and his scientific school have brilliantly shown that so far only the achievements of Optimization Theory (OT) are the basis of very simple algorithms for searching the global extremum, which correctly decode received messages directly near the Shannon's bound and with linear complexity, which is the ultimate goal of coding theory. The monograph, which originally presented the first revolutionary results of a new scientific direction, was published by the Scientific Council on the Complex Problem of "Cybernetics" of the USSR Academy of Sciences and published in the publishing house "Nauka" (Science) back in 1981.

It is in these conditions that the Optimization Theory (OT) of noise-resistant decoding has been developing in Russia for many decades, which successfully solves the problems of optimal, best-in-veracity decoding at a completely new, one can say, fundamentally different, deep philosophical level, but with theoretically minimal, linear complexity depending on the code length and in conditions of the maximum permissible noise level of digital channels. And the minimum possible complexity is just that allows

them to create simple and very fast decoders for very long codes. The author and other pioneers in this field in their, of course, a very unexpected style and results the books and articles over the decades of hard work showed absolutely new features like the long-known standard and improved methods of wonderful Viterbi algorithm (VA), and a new iterative algorithms based on multithreshold decoding (MTD), implementing effective procedures for the searching global extremum functionals.

The key theme that determines the value of this outstanding monographs, are a variety of extensive results that convincingly demonstrate quite convenient technological solutions to the problem of simple high-confidence decoding near the channel bandwidth posed 70 years ago by C. Shannon. It is completely incomprehensible why, over all these years, no one has paid attention to the fact that the problem of optimal decoding can also be formulated as a classical global optimization problem, which, if applied to the coding theory, it acquires, of course, some specific features that do not change the essence of this well-understood and long-worked-out problem of the search for a global extremum. It is very strange that this idea was already published by the OT scientific school in that millennium, but did not find a response from specialists.

The starting point in a large set of completely unique paradigms of OT, a fundamentally new theory in all respects, which the school supporters call the "quantum mechanics" of information theory, was the Main Theorem of multithreshold decoding (OTMTD). Right in the very first of its extremely simple but very exact wording carrier deepest philosophical sense, it told the engineers and the scientific community that a properly organized the simplest of majoritarian is inherently iterative algorithms for each change of decoded symbols strictly come nearer to the decision of the optimal decoder (OD), for which previously was required to make full exponentially complicated searching, which for example the Viterbi algorithm (VA) makes quite elegantly. The appearance of the OTMTD revolutionized the decoding tasks for all types of channels with independent distortion. Now it is possible to use MTD decoders for almost any class of majoritarian decoded codes and with only linear (!) complexity of the algorithm depending on the code length, try to achieve OD decisions even for a large relative noise level of the channel.

And it is an extremely sad circumstance that in none of real scientific centers in which this so fundamentally updated and very much updated method could develop, an effective coding theory based on OT, for 40 years of its subsequent existence, no one bothered to pay attention to this unexpected possibility of extremely simple decoding with potentially the best possible results on the veracity of the decoder's decisions.

The author of the monograph, however, even in those distant years, immediately clearly and clearly pointed out that when solving the optimization problem of decoding, his extremely precisely formulated special theorem, which is the cornerstone for the fate of the OTMTD theory, does not promise to achieve necessarily the OD decision. That is why the members of the scientific school of the monograph author, who created this complete and now quite perfect large-scale theory of "everything" in coding, have been continuously engaged all these years precisely in the search for conditions that should be performed so that the decoding process, i.e., the search for the global extremum of the functional, is as long as possible. Here it is very important that this search does not stop somewhere halfway to the optimal decision, which is the code word closest to the message received from the channel.

And this task was also solved in OT! The OT school has created due to a special theory of error propagation (EP) in majoritarian decoding for this purpose, which no scientific researcher group has been able to approach in the last 50 years in the world. And its main result was that the EP theory made it possible quickly and simply to build

codes using which MTD decoder was indeed able to almost always achieve optimal decisions, even at extremely high noise levels, i.e. near the channel capacity.

All the obvious, and sometimes quite unexpected ways to achieve the OD decision based on MTD algorithms and a number of other methods are just described in all their diversity in this book. The author clearly shows that for a large number of channels and codes, it is already possible to achieve a very high level of confidence at a high noise level based on MTD decoders and a number of methods derived from them. As it will be seen from the subsequent materials of the book, this problem is indeed already very successfully solved in many cases, or for some clusters of parameters, it will certainly be solved by methods already known in OT in the immediate vicinity of the digital channel capacity. It gives us the right to reasonably believe that it is Russian science, represented by the author of this monograph, that has completely solved Shannon's problem for all standard digital channels considered in coding theory.

The task of expanding the list of such code clusters (i.e., sets of channel parameters, codes and decoders) will now be constantly solved, and the OT field will expand, since all the conditions for this have already been created by the author's scientific school.

Thus, for obvious reasons, we can assume that the former coding theory has passed the palm of the championship to OT, the new "quantum mechanics" of information theory. This conclusion is due to the fact that the OT technologies provide the best veracity with the minimum decoding complexity up to the nearest vicinity of the Shannon's bound.

We emphasize that the author and his scientific school have obtained a number of extremely important results in a variety of technological fields related to coding theory. The most significant applied achievement of OT is the expansion of the actions field of the OTMTD actually affect the entire set of methods for iterative decoding of linear codes, both block and convolutional:

these are concatenated circuits of various types, channels with erasures, ultra-fast hardware and software versions of decoders, as well as, which is also quite unusual and even completely unexpected in general for the entire coding theory, the symbolic codes.

These non-binary codes are associated with the amazing properties of human search thinking, which sometimes bypasses the most important areas of knowledge, for the study of which such thinking should be involved. The fact is that symbolic codes are non-binary majority decoded codes. They were discovered, as well as the usual threshold algorithms, by the founder of this direction, the outstanding American scientist J. Massey. He got some results for such codes and published them in his classic book about threshold decoding. However, when analyzing such codes, he demanded from them such exceptionally high characteristics that they in principle could not provide. And as a result of this considerable frustration, he refused to further study such code structures. And because of this, researchers around the world, undoubtedly believing the opinion of this respected scientist, for the next 50 years did not even try to apply majority algorithms to non-binary codes, which, as it were, did not exist. But it just happened, that all the other non-binary codes and decoders created by "classical" science over this long period did not become outstanding achievements of coding theory, although they were useful.

But the author of the monograph and his school were very attentive to the codes that were once rejected by Massey, clearly separated them from other types of codes and called them symbolic. To date, the members of the OT school have written an absolutely complete theory for these structures they rediscovered, as well as for particularly simple symbolic MTD decoders that implement global search functions an

extremum on digital streams with a certain code structure, and also with a minimum linear complexity of the code length.

By the way, it is very useful to draw the attention of readers of this book to the fact that for a truly triumphant march of symbolic codes in the world of coding systems, the authors of symbolic algorithms immediately changed and patented the rules for the operation of the threshold element (TE) for these codes — the main active element in all MTD. It was main moment that decided the fate of the world competition among non-binary algorithms. It simply did not take place, as they say, "for a clear advantage" of symbolic codes in all parameters of efficiency and complexity, since symbolic decoders with linear complexity from the length of the codes converge to the optimal decision even at very high noise levels of the channel. This can be seen by reading the relevant sections of this monograph or previously published books and articles by the author and the school of OT on this topic.

And at the same time, it is important to emphasize that in general, all variants of MTD algorithms are extremely simple devices or programs with well-understood principles of majoritarian algorithms, which is extremely useful for their development, application, training and further progress of this scientific topic.

The monograph pays deservedly deep attention to many other ideas that have emerged in the course of the development of OT: the principle of divergence, parallel concatenation, codes with dedicated branches, and other systems and principles of organizing a new very unusual coding style, which have formed their own special extensive intellectual space of OT paradigms. All of them really help to create, research, and implement exceptionally simple decoding methods at high noise levels. Note that previously none of the listed concepts in the coding theory not at all. But their role in OT and in successfully solving decoding problems has indeed proved to be extremely important. Just as important in OT is the role of decoders with direct metric control (DPCM). The DPCM group includes all methods using MTD and VA. This approach takes the research of decoders based on VA and MTD to a completely new level, work on which has already allowed us to obtain another extremely important result — the creation of a block version of the Viterbi algorithm (BVA) with complexity, close to the complexity of the classical VA for convolutional codes, which the author of the book also, like many other achievements, promptly patented. This result for one of the most important algorithms of the last century is impressive in itself, since the complexity estimates of the "old " coding theory for block versions of VA actually correspond to twice the exponential complexity compared to convolutional codes, which, of course, made them completely inaccessible for use in real systems.

It is worth emphasizing that the school of OT has long and successfully developed this area of applied coding theory, which was also undeservedly forgotten by the former "classical" theory against the background of turbo and other "achievements" of theorists.

All monographs on MTD and OT have repeatedly used the capabilities of network portals

www.mtdbest.ru and www.mtdbest.iki.rssi.ru

to illustrate many of the results of MTD algorithms the author's scientific school, the first of which is updated quite often. This makes it much easier to understand the results in OT correctly. Our newest portal

www.decoder-zolotarev.ru

is also very popular among reader.

The use of the resources of these portals in this monograph is even more diverse and complete. These websites, with a total of more than 1000 information blocks, feature a large number of demo programs on all of the world's most well-known decoding algorithms. These thematic bilingual portals are sometimes visited by more than 100 thousand readers a year from more than 90 countries of the world, which especially well and accurately characterizes the full and unconditional recognition of the technologies and paradigms of OT and its results by the world scientific and technical community.

Moreover, the special software platforms presented on the first and third of these network resources really allow all specialist to move quickly on to full-fledged scientific work in the OT field.

The author of the monograph is a laureate of the Government Prize Russian Federation for Science and Technology. The European Union (EU) awarded the creator of the OT the Gold Medal "For Exceptional Achievements", which in Europe is awarded only for the most outstanding scientific results. And at the recent International Exhibition of Inventions, he was awarded a Gold Medal for a patent for a super-fast MTD decoder.

As for the level of the current and far from modern coding theory both in our country and abroad, the single general dramatic diagnosis of its condition is due to an extremely strange circumstance for the digital civilization. The fact is that no one knows how to calculate the main characteristics of effective decoders for a large noise level. Probably, this will never happen for any algorithms. It is possible that this cannot be done simply in principle. And no one knows how to program! This can be said about almost all specialists in the field of codes. And the slogan of the end of that millennium: "**Programming is the second literacy!**" - is now completely forgotten. All this was the end of "that" purely mathematical coding theory.

But coding theory is not a mathematical problem at all! This is one of the optimization tasks in discrete spaces with an error-correcting array structures. And all their main characteristics, perhaps, will always be determined only experimentally, on software models and hardware layouts, which usually give such results on the characteristics almost "instantly".

All this was understood by the scientific school OT more than half a century ago, which allowed it to win an incredibly large-scale and most important scientific competition in the information theory at the very beginning of the digitalization of our world.

So declared the author of this monograph in a very soft the absolute priority and global leadership, as he measured very modestly, in 20÷30 years, there is indeed, as now they can't even see on the horizon of the research groups that at least begun to create for the development of the application of coding theory any software optimization, modeling and design complexes for the research and construction of new very fast optimal coding systems operating near Shannon's bound. Indeed, only the creation of such software requires, as was the case with the OT school, decades of intense and complex work, which especially emphasizes the ability of the author of this book to foresee the future of his science branch, the equal of which may not appear for a very long time. The difficult experience of the OT school shows that, in addition to the decision to develop certain complexes of such intellectual software systems, it also takes some time and a lot of accumulated personal experience to understand what exactly these innovative complexes should be. And this is also a long, stressful years of very hard work.

The OT school offers its extensive set of such software tools to all specialists. This set, as the head of the school believes, will be continuously expanded and become more and more accessible to all.

Turning to the final remarks about this book, which is unique in the theory of coding and in the history of science in general, I will allow myself to remind you that the readers are holding in their hands a really extremely important monograph, which marks, finally, the long-delayed transition of the entire applied coding theory into a completely new phase of its development, focused on the creation of truly affordable effective error correction algorithms of guaranteed quality. It is based on a strong union of theory and experiment. It is extremely unfortunate that this transition did not occur about 30 years ago, when the full OT theory was already created. It becomes no longer a problem, but a technological task of searching global optimization of functionals with a very large number of variables in discrete spaces with a structure that takes into account the properties of correcting codes. Many of the algorithms considered in the monograph and deeply researched successfully work in the immediate vicinity of Shannon's bound. And it is very important that all OT methods are well-known simple majoritarian decoders with correctly selected parameters or modifications of widely used decoders that work as different types of Viterbi algorithm, which is loved and also perfectly understood by all digital communication engineers.

The situation that has developed to date around OT, according to a considerable number of specialists in coding theory, strongly resembles the state of physics at the beginning of the twentieth century, when many current problems were impossible to solve by the methods available to science at that time. And only the emergence of a number of completely new paradigms for physics related to the principles of the structure of our world, which later formed quantum mechanics, allowed us to reach new frontiers of scientific knowledge of our physical world.

A number of great physicists of their time were then deservedly awarded the Nobel Prize, although the physics of the beginning of that century for quite a long time did not belong to any relevant branches of knowledge. Its public recognition took place already in the 1930-1940s.

The importance of OT, its technologies and paradigms is extremely high because it has already become a new "quantum mechanics" in the applied information theory. It is also extremely important that the OT has been created and has already been successfully completed in all its main aspects in the most important period of the rapid development beginning of our digital information civilization, which until very recently was not able to provide the necessary high reliability of its information content by simple means. That is why, for our modern world, the importance of OT, a very meaningful, compact and perfect science, is many times greater than the importance of quantum mechanics for physics, as it was at the very beginning of the last century.

At the end of our introductory review, we will also agree that such a book about a complete solution for Shannon's problem is absolutely unusual and therefore, of course, completely unexpected for the main contingent of world science engaged in coding issues. We also note that publications with the participation of members of the Russian Academy of Sciences and specialists in the field of digital technologies are already being published, where they confirm the exceptional value of the results of the author of this monograph and believe, that the MTD algorithms, symbolic codes, and the error propagation theory for majoritarian decoding fully correspond to the Nobel level of the author's research, both taken together and separately.

And the technologies of setting the parameters of codes and decoders, algorithms for correcting erasures and a set of new OT paradigms, as well as many dozens of author's patents — most of them are certainly outstanding discoveries in the field of applied coding theory. And this is really so, which is confirmed by the network portals of the scientific school of OT, which, as I noted above, have been reading for a long time experts from all over the world.

Especially clearly the perfection of OT emphasizes its extreme compactness, the minimum number of formulas describing the capabilities of all V.V. Zolotarev's algorithms in various channels, and the deep philosophical essence, which, I think, can be discussed and analyzed by historians of science for a very long time.

It can be estimated that the entire OT has a volume that is about three orders of magnitude smaller than the very swollen former one a theory that has long failed to produce any reasonable results, as we have repeatedly pointed out in our new reviews on the applied issues of the scope of coding theory.

I would also like to express my complete satisfaction with the publication of such an unusual monograph due to the fact that 2018 turned out to be the anniversary year for coding theory. More than 70 years ago, Claude Shannon actually put this problem of simple and efficient decoding before science and technology in his remarkable the article. It is very pleasant to find its successful solution in every sense right now in the monograph of an outstanding Russian scientist.

The history of science has never known a small scientific school to develop fully in a fundamentally new direction such a grandiose and inertial, but at the same time so necessary for communication technology, the most complex branch of science, almost completely solving all the previously formulated applied problems for it.

And in conclusion, I express my firm belief that the most up-to-date results of the new "quantum mechanics" of the modern theory information presented in this unique monograph will serve as a large-scale worthy contribution of all Russian science to the development of new methods and technologies of digital data processing, as well as the entire information theory in general for the digital information community at the beginning of the new millennium.

Laureate of the USSR State Prize,
Zubarev

Yu.B.

Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences,
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Honored Scientist of the Russian Federation,
laureate of the State Prize,
twice winner of the Prize of the Government of the Russian Federation

About the new format of applied coding theory

(The second translated Russian text)

The problem of more easily ensuring the high reliability of digital data transmission, processing, storage and recovery is becoming more and more urgent all over the world. However, until recently, it seemed that a successful solution to the problem of creating simple and highly efficient decoders of various types, even near the Shannon's bound, which is the main applied goal of coding theory, is still very far away.

In fact, to do this, it was necessary to find decoding methods in four traditional channels in classical theory: binary symmetric, non-binary, Gaussian, and erasing channels, for the implementation of which previously often involved various and often quite heavy, as well as far from the most effective ideas. But all of them eventually turned out to be very time-consuming and far from the possible level of efficiency that the theory estimated.

Against the background of this long-term crisis, all these decades' works looked quite different of our scientific school of Optimization Theory (OT) of noise-resistant coding, which was started about half a century ago by Professor of Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Valery Vladimirovich Zolotarev. For the first time in the world, having set the task of iterative gradual approximation to the best optimal decision in terms of error probability, he and the active followers of our school began almost immediately to obtain very high reliability characteristics of the developed algorithms with extremely simple schemes for their implementation, which was very natural, since the basis of the new algorithms, which we called multithreshold decoders (MTD) were the simplest long-known James Massey's threshold decoders. But high reliability MTD decoders, practically coincided with the optimal decoding (OD) that was previously provided only total searching methods, such as the Viterbi algorithm (AB), - these properties for higher noise levels our decoders for many decades acquired slowly with evolved OT together with a very extensive and large-scale software. Very helpful in quickly improving the performance of our algorithms it was the growth of the performance of the computing tools available to us, as well as the optimization software that we continuously develop.

This feature of research in our scientific school is crucial for the progress of the OT theory itself and for obtaining new results in the design and analysis of the properties of decoding algorithms, as well as for improving their characteristics.

It is with such an absolutely atypical for the previous theory, but very fruitful formulation of the problem of simple high-precision transmission of digital data over channels with noise that V. V. Zolotarev has already published with the participation of enthusiasts of the school many monographs on OT, which describe solutions to many extremely complex problems, that have ensured that OT algorithms in the immediate vicinity of the Shannon's bound have achieved the minimum complexity and really the best veracity.

The new monograph of Professor V.V. Zolotarev, offered to specialists, presents the OT theory and its newest applied achievements in the field of decoding algorithms development and creation. In the case of MTD decoders, they provide real optimal decoding with the minimum possible linear implementation complexity depending relatively the length of the codes. And when using block modifications of VA, as follows from the presented data, all the best decoding parameters for short codes are already achievable, which are now not available to any other algorithms. This is determined by the fact that only all MTD decoders and VA in all their modifications measure the distances of their decisions to the accepted vector. The experience of our research shows that no algorithms devoid of such exceptionally useful properties 'shave any prospects of reaching the Shannon bound with reasonable complexity of their implementation.

Thus, the approval of the absolute OT leadership and the final "care" with the real field of science earlier theory was due to the fact that for the united criterion "noiseproofness - veracity - complexity" that "old" theory could not find or all the time of their existence analytical expressions for each of these parameters of the criterion at least for one of its algorithms that claimed to have high noise immunity characteristics. But the adepts of the previous era simply could not develop both the theory and the experimental base at the same time.

This means that the coding theory in its applied aspect really turned out to be not a mathematical problem at all. Having realized this long ago, the OT school completely solved Shannon's problem for all traditional channels, as a task of global functions optimization of a in digital spaces with a complex nature, while remaining exclusively within the framework of very clear majoritarian decoders and the Viterbi algorithm. Others comparable to OT methods there are no outside of it now. And it is difficult to expect their appearance. All the characteristics of the OT algorithms according to a united criterion are now the best and are instantly determined during modeling by means of our innovative optimization software, which further accelerates the development of OT and helps it quickly point out new growth points.

It is useful to note the exceptional compactness of the OT and its completeness. OT technologies work perfectly and have already demonstrated high results for about a hundred different clusters of encoding parameters. One of the leading roles in the current rapid progress of OT undoubtedly belongs to the author of this monograph Professor V.V. Zolotarev, which presents the latest data on the fundamental scientific and applied developments of the theory created by him.

Supporters of the scientific school of OT believe that the successful theoretical and experimental work of all specialists interested in the further development of applied coding methods, including in the areas indicated in the last chapters of this monograph, will allow us to continue very quickly to promote the technique of noise-resistant coding to ever higher levels of technology.

This is exactly what the digital information community of the new millennium needs from the advanced theory that has become the "quantum mechanics" of modern information theory.

Professor, Doctor of Technical Sciences
Ovechkin

G. V.

Head of the Department
of Computational and Applied Mathematics
of Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Chairman of the Scientific and Methodological Council of RSREU

От научного редактора

Широкое использование систем формирования информационных потоков и их обработки, а также хранения, восстановления, сопровождения и передачи по разнообразным каналам связи является основой нашей технологической цифровой цивилизации. Её информатизация достигла уже весьма высокого уровня и продолжает интенсивно развиваться.

В этой монографии изложена полная теория и представлены масштабные высокоинтеллектуальные программные средства исследования сложных оптимизационных задач, которые позволили её автору полностью решить великую проблему Шеннона, поставленную им более семидесяти лет назад перед будущим информационным сообществом в своей исторической для судеб теории кодирования статье «Математическая теория связи». Как руководитель небольшой российской научной школы Оптимизационной Теории (ОТ) помехоустойчивого кодирования профессор В.В. Золотарёв совершил, безусловно, настоящий научный подвиг, разрешив вместе с членами своего небольшого коллектива практически все теоретические проблемы и подготовив необходимые технологии для решения главной прикладной задачи этой отрасли науки — проектирования и создания алгоритмов декодирования для всех классических моделей каналов, рассматриваемых этой сложной многокомпонентной теорией.

Простому изложению всех этих решений сложнейших, как они оценивались ранее и до сегодняшнего дня всеми специалистами, задач в сфере теории кодирования и посвящена эта столь необычная книга. Для каждой из рассмотренных в монографии проблем автор нашёл столь удобные, наглядные и теперь уже совершенно очевидные для мыслящих специалистов решения, что все технические параметры его алгоритмов естественно оказываются вообще наилучшими возможными для методов декодирования как при программном, так и при аппаратном вариантах их реализации вплоть до областей шума канала, близких к границе Шеннона. И подчеркнём, что, тем не менее, эта задача в своём полном объёме и по сей день оставалась на нашей планете абсолютно неприступной для всей многомиллионной армии специалистов в сфере кодирования в течение последних пятидесяти лет.

Однако оценить всю философскую, научную и технологическую глубину и совершенство решённой автором этой монографии проблемы можно, только поняв масштабы кризиса, в котором много десятилетий прозябала вся теория помехоустойчивого кодирования. Поэтому вернёмся сначала к общей ситуации последнего времени в этой важнейшей для нашей цифровой цивилизации отрасли науки.

Научная информатика осваивает всё более широкие области современных цифровых технологий, активно внедряется в разнообразные системы мониторинга природы. Но проникновение цифровой идеологии во все стороны жизни современного человека сопровождается и серьёзными кризисными явлениями. Более того, масштабы этого кризиса в некоторых основных сегментах теории информации стали воистину беспрецедентными, затяжными и беспросветными. Основные трудности информатики долго нарастали в сфере самых основ теории информации и в той её сложнейшей и, конечно же, интереснейшей (!) части, которую составляют теория, технологии и алгоритмы помехоустойчивого кодирования. Несмотря на очень большое число специалистов, которые, вроде бы, занимаются развитием методов простого декодирования цифровых потоков в очень дорогих дискретных каналах, можно считать, что, кроме полезного периода освоения алгебраических методов помехоустойчивого кодирования около 60 лет назад, все последующее полвека успехи теоретиков практически были равны нулю. Но при этом наблюдался просто вал публикаций как в виде статей, так и огромного числа монографий, которые иногда очень по-своему излагали совершенно очевидные ве-

щи, но претендовали на большой вклад в науку, хотя их реальные прикладные результаты практически ничего не меняли по существу вопроса.

Нерешённые проблемы этой главной науки цифрового мира продолжали накапливаться, что в значительной мере определялось и тогда, и сейчас абсолютной приверженностью большого числа учёных, работающих в этой сфере, алгебраическим основам этой теории. Однако на самом деле алгебраическая теория за многие годы своего очень условного лидерства не решила вообще никаких основных проблем своего развития: не нашла простых способов коррекции ошибок выше уровня половины кодового расстояния, не преодолела трудностей декодирования блоковых кодов в гауссовских каналах, а также не вышла на линейный от длины кодов уровень сложности алгоритмов коррекции ошибок, что, конечно же, тормозило и развитие цифровой техники. Значительные трудности были у алгебраистов и при анализе свёрточных кодов. Кроме того, их неспособность уже более полувека найти хоть какие-либо методы коррекции для недвоичных кодов, которые оказались бы лучше тех, что были предложены 60 лет назад для кодов Рида — Соломона (РС), совсем разуверила инженеров-связистов в возможности появления каких-либо новых результатов и в этом кластере параметров. А ведь это исключительно важная сфера применения кодов в вычислительных системах, поскольку цифровые фото, музыка и ТВ используют как раз недвоичные, байтовые массивы информации.

На этом фоне явного кризиса теории появление в 1967 г. алгоритма Витерби (АВ) для свёрточных кодов можно считать воистину настоящим спасением теории кодирования в своём важнейшем прикладном аспекте, поскольку схема с формально экспоненциальным с длиной кода ростом объёма вычислений декодера обеспечила сразу столь высокие характеристики, которые оказались вполне достаточными для почти всех систем связи в течение многих последующих десятилетий. Правда, АВ мог быть реализован и тогда, и сейчас только для коротких кодов.

Напомним, что полезность применения кодирования, мера его эффективности, например, в технике связи при передаче двоичных данных обычно определяется параметром энергетического выигрыша кодирования (ЭВК), который просто характеризует величину кажущегося увеличения мощности передатчика системы связи, использующей хорошие методы кодирования и, главное, последующего высокодостоверного и быстрого декодирования принятого цифрового потока. А поскольку этот эффект может достигать величины 3, 5, 10 и даже более раз (свыше 10 дБ), то становится понятной исключительная важность применения кодирования, которое просто «дарит» системе связи столь большой ресурс по мощности передатчика. Этот большой прирост доступной связистам энергии создаёт возможность существенного повышения скорости передачи цифровых данных, значительного снижения размеров очень дорогих антенн, многократного увеличения дальности связи и улучшения на много порядков достоверности принятой информации, а также ряд других весьма важных достоинств цифровых систем связи, использующих помехоустойчивое кодирование.

К этому можно добавить и потребности в кодировании у совсем новых направлений развития цифрового мира. Занимающиеся Интернетом вещей специалисты, конечно, согласятся с тем, что реально хорошие методы кодирования потратят вообще ничтожную долю энергии автономных источников питания на коррекцию возможных ошибок по сравнению со случаем, когда коды не применяются. И это так же важно, как и работа хороших алгоритмов декодирования вблизи пропускной способности канала, т. е. при минимально возможной мощности сигнала передатчика, что также сильно экономит заряд батарей. Таких полезнейших свойств кодов очень много и все они оказываются очень кстати для всей широкой сферы приложения кодирования.

Напомним далее о том, что за полувековой сложный период своего относительно активного существования «классическая», так сказать, теория кодирования, ориентированная в своём главном прикладном аспекте на разработку методов кодирования, пыталась организовать и поиск других алгоритмов декодирования, поскольку кроме экспоненциально сложного АВ её успехи были крайне незначительны. Не вдаваясь во все второстепенные теперь детали таких смен направлений развития, интересных сейчас только для историков науки, отметим лишь некоторые черты таких алгоритмов, которые так и не стали судьбоносными для той теории. Все они являются весьма общими у турбо кодов, низкоплотностных (LDPC) и полярных кодов. Самой неудобной для всех алгоритмов декодирования этих кодов оказалась необходимость использования в своих вычислениях действительных чисел. Это сразу сильно ограничило сферу их применимости, особенно для высокоскоростных каналов. Но, более того, и решающие функции этих алгоритмов, загружавшие процессоры, реализовавшие такие алгоритмы, оказались довольно сложными сами по себе. А дополнительные высокие требования, например, к точности вычислений выражений, используемых при декодировании полярных кодов, и вообще смотрятся как неоправданно экстремальные, так как в некоторых публикациях авторы пишут о недостаточности для них обычной точности представления действительных чисел в компьютерных системах. Да и собственно объём необходимых вычислений всех этих «новых» алгоритмов оказался весьма большим.

К этому необходимо добавить, что, к тому же, за последние десятилетия фактически никакие авторские коллективы не утруждают себя такой подготовкой публикуемых материалов по алгоритмам декодирования, чтобы из них можно было получить точное и — главное (!) — правильное представление об их сложности, помехоустойчивости и достоверности. Это полностью лишает читателей таких материалов какой-либо уверенности в достоверности и применимости этих результатов. Поэтому реально доступные связистам алгоритмы декодирования нередко оказываются слишком сложными и медленными или слабыми и не представляющими интереса для техники связи. Переводные книги, в том числе и учебного типа, также многословны и обычно излагают давно устаревшие результаты.

Но, как уже более сорока лет известно, оптимальное решение (наилучший по вероятности обнаруженной ошибки результат) при декодировании кодов на самом деле может быть успешно найдено на основе оптимизационного поиска на экспоненциально растущем с длиной кода массиве возможных решений. Это стало отправной точкой воистину впечатляющих многолетних исследований автора этой уникальнейшей монографии, получившего авторское свидетельство на такое неожиданное решение проблемы помехоустойчивого кодирования почти полвека назад. И сложность этого поиска — наилучшая из возможных, минимальная, линейно растущая с длиной кодов, что тоже всегда исключительно важно.

Многочисленные работы автора монографии и его научной школы с блеском показали, что пока лишь достижения Оптимизационной Теории (ОТ) являются основой очень простых алгоритмов поиска глобального экстремума, которые правильно декодируют принятые сообщения непосредственно вблизи границы Шеннона и с линейной сложностью, что и является конечной целью теории кодирования. Монография, в которой первоначально были представлены первые революционные результаты нового научного направления, была издана Научным советом по комплексной проблеме «Кибернетика» АН СССР и опубликована в издательстве «Наука» ещё в 1981 году.

Именно в этих условиях в течение уже многих десятилетий в России развивается Оптимизационная Теория (ОТ) помехоустойчивого декодирования, которая на совершенно новом, можно сказать, принципиально ином глубоком философском уровне успешно решает проблемы оптимального, наилучшего по достоверности декодирования, но при теоретически минимальной, линейной от длины ко-

да сложности и в условиях максимально допустимого уровня шума цифровых каналов. А минимальная возможная сложность как раз и позволяет создавать простые и очень быстрые декодеры для очень длинных кодов. Автор и другие первооткрыватели этого направления в своих, конечно же, крайне неожиданных по стилю и результатам книгах и статьях за десятилетия напряжённой работы показали совершенно новые возможности как давно известных стандартных и улучшенных методов типа замечательного алгоритма Витерби (AB), так и новых итеративных алгоритмов на основе многопорогового декодирования (МПД), реализующих эффективные процедуры глобального поиска экстремума функционалов.

Ключевой темой, определяющей ценность данной выдающейся монографии, являются разнообразные обширные результаты, убедительно демонстрирующие вполне удобные технологичные решения поставленной 70 лет назад Клодом Шенноном проблемы простого высокодостоверного декодирования вблизи пропускной способности канала. Совершенно непостижимо, почему за все эти годы никто не обращал внимания на то, что проблема оптимального декодирования может формулироваться и как классическая глобальная оптимизационная задача, которая в случае применения к теории кодирования приобретает, конечно, некоторые специфические особенности, не меняющие сущности этой вполне понятной и давно проработанной проблематики поиска глобального экстремума. Весьма странно, что эта идея уже была опубликована научной школой ОТ ещё в том тысячелетии, но не нашла отклика у специалистов.

Стартовой установкой в большом наборе совершенно уникальных парадигм ОТ, принципиально новой во всех отношениях теории, которую сторонники школы называют «квантовой механикой» теории информации, стала Основная Теорема многопорогового декодирования (ОТМПД). Прямо в самой первой своей крайне простой, но очень точной формулировке, несущей глубочайший философский смысл, она сообщила инженерам и научному сообществу о том, что правильно организованные самые простейшие мажоритарные по своей сути итеративные алгоритмы при каждом изменении декодируемых символов строго приближаются к решению оптимального декодера (ОД), для достижения которого раньше обычно требовалось осуществлять полный экспоненциально сложный перебор, что вполне элегантно, например, делает алгоритм Витерби (AB). Появление ОТМПД самым революционным образом поменяло постановки задач декодирования для всех видов каналов с независимыми искажениями. Теперь стало возможным использовать МПД декодеры практически для любых классов мажоритарно декодируемых кодов и при всего лишь линейной (!) от длины кода сложности алгоритма попробовать достигать решений ОД даже при большом относительном уровне шума канала. И крайне печальным обстоятельством оказывается то, что ни в одном из всего лишь нескольких реальных центров страны, в которых могла бы развиваться эта столь принципиально обновлённая и очень эффективная теория кодирования на базе ОТ, за 40 лет последующих лет её существования никто не удосужился обратить внимание на эту неожиданную возможность крайне простого декодирования с потенциально наилучшими возможными результатами по достоверности принятых декодером решений.

Автор монографии, однако, ещё в те далёкие годы сразу чётко и ясно указал, что при решении оптимизационной задачи декодирования эта исключительно точно сформулированная особая краеугольная для судеб теории ОТМПД теорема вовсе не обещает обязательного достижения решения ОД. Именно поэтому члены научной школы автора монографии, создавшие эту полную и теперь уже вполне совершенную масштабную теорию «всего» в кодировании, все эти годы были непрерывно заняты именно поиском условий, которые должны выполняться для того, чтобы процесс декодирования, т. е. поиска глобального экстремума функционала, был по возможности более долгим. Здесь очень важно, чтобы этот поиск не прекращался где-нибудь

на полпути к оптимальному решению, которым является кодовое слово, ближайшее к принятому из канала сообщению.

И эта задача также оказалась решённой в ОТ! Школа ОТ создала для этого особую теорию размножения ошибок (РО) декодирования, к которой не смог за последние 50 даже подступиться ни один научный коллектив в мире. А её главный результат оказался в том, что теория РО позволила быстро и просто строить коды, используя которые МПД декодер действительно смог уже практически всегда достигать оптимальных решений даже при экстремально большом уровне шума, т. е. вблизи пропускной способности канала.

Все очевидные, а иногда и довольно неожиданные способы достижения решения ОД на основе МПД алгоритмов и ряда других методов как раз и изложены во всём своём многообразии в данной книге. Автор доступно и понятно показывает, что для большого числа каналов и кодов уже возможно достижение очень высокого уровня достоверности при большом уровне шума на основе МПД декодеров и ряда производных от них методов. Как будет видно из последующего материала книги, эта задача действительно уже во многих случаях очень успешно решена или для некоторых кластеров параметров она будет безусловно решена уже известными в ОТ методами в непосредственной близости от пропускной способности цифрового канала. Это и даёт нам право обоснованно считать, что именно российская наука в лице автора данной монографии полностью решила проблему Шеннона для всех стандартных цифровых каналов, рассматриваемых в теории кодирования. Задача расширения списка таких кодовых кластеров (т. е. совокупностей параметров каналов, кодов и декодеров) будет теперь постоянно решаться, а поле ОТ расширяться, т. к. все условия для этого научной школой автора уже созданы.

Таким образом, по уже вполне понятным причинам можно считать, что прежняя теория кодирования передала пальму первенства ОТ — новой «квантовой механике» теории информации. Этот вывод обусловлен фактом обеспечения технологиями ОТ наилучшей достоверности при минимальной сложности декодирования вплоть до ближайших окрестностей границы Шеннона.

Подчеркнём, что автор и его научная школа получили целый ряд исключительно важных результатов и в самых различных технологических сферах, связанных с теорией кодирования. Наиболее существенным прикладным достижением ОТ является расширение области действия ОТМПД фактически на всё множество методов итеративного декодирования линейных кодов, как блоковых, так и свёрточных: это каскадные схемы разных типов, каналы со стираниями, сверхбыстрые аппаратные и программные варианты декодеров, а также, что тоже совершенно необычно и даже абсолютно неожиданно вообще для всей теории кодирования, — символьные коды.

Эти недвоичные коды связаны с удивительными свойствами поискового человеческого мышления, которое иногда обходит своим вниманием именно те важнейшие области знания, к исследованию которых такое мышление как раз и должно было бы привлекаться. Дело в том, что символьные коды относятся к недвоичным мажоритарно декодируемым кодам. Они были открыты, как и обычные пороговые алгоритмы, основоположником этого направления, выдающимся американским учёным Дж.Месси. Он получил некоторые результаты для таких кодов и опубликовал их в своей классической книге по пороговому декодированию. Однако при анализе таких кодов он потребовал от них таких исключительно высоких характеристик, которые те в принципе не могли обеспечить. И в результате немалого вследствие этого разочарования он отказался от дальнейшего изучения таких кодовых структур. А из-за этого и исследователи всего мира, безусловно поверив мнению этого уважаемого всеми учёного, в течение последующих 50 лет даже не пытались применить мажоритарные алгоритмы к недвоичным кодам, которых как бы и не было. Но так получилось, что и все прочие недвоичные коды и декодеры, созданные «классической» наукой за этот длительный период, не стали выдающимися

достижениями теории кодирования, хотя и были полезными.

А вот автор монографии и его школа очень внимательно отнеслись к кодам, когда-то отвергнутым Мессии, чётко отделили их от прочих типов кодов и назвали символьными. К настоящему времени члены школы ОТ написали вообще абсолютно полную теорию для этих переоткрытых ими структур, а также для особо простых символьных МПД декодеров, реализующих функции глобального поиска экстремума на цифровых потоках с определённой кодовой структурой, причём также при минимальной линейной от длины кода сложности. Кстати, очень полезно обратить внимание читателей этой книги на то, что для действительно триумфального шествия символьных кодов в мире систем кодирования авторы символьных алгоритмов сразу же немного поменяли и запатентовали правила работы порогового элемента (ПЭ) для этих кодов — главного активного элемента во всех МПД. Именно этот момент и решил судьбу мирового конкурса среди недвоичных алгоритмов. Он просто не состоялся, что называется, «за явным преимуществом» символьных кодов по всем параметрам эффективности и сложности, т. к. декодеры символьных МПД с линейной сложностью от длины кодов сходятся к оптимальному решению даже при очень больших уровнях шума канала. В этом можно убедиться, читая соответствующие разделы этой монографии или ранее изданные книги и статьи автора и школы ОТ по этой тематике. И при этом важно подчеркнуть, что вообще все варианты МПД алгоритмов являются крайне простыми устройствами или программами с хорошо понятными принципами работы мажоритарных алгоритмов, что крайне полезно для их разработок, применения, обучения и дальнейшего прогресса этой научной тематики.

В монографии уделяется заслуженно глубокое внимание и многим другим идеям, возникшим в процессе развития ОТ: принципу дивергенции, параллельному каскадированию, кодам с выделенными ветвями и другим системам и принципам организации нового очень необычного стиля кодирования, образовавшим своё особое обширное интеллектуальное пространство парадигм ОТ. Все они действительно помогают созданию, исследованиям и реализации исключительно простых методов декодирования при большом уровне шума. Отметим, что ранее ни одного из перечисленных понятий в теории кодирования вообще не было. Но их роль в ОТ и в успешном решении проблем декодирования действительно оказалась чрезвычайно важной.

Столь же велика в ОТ и роль декодеров с прямым контролем метрики (ДПКМ). К группе ДПКМ относятся все методы с использованием МПД и АВ. Этот подход выводит исследования декодеров на основе АВ и МПД на совершенно новый уровень, работа на котором уже позволила получить ещё один чрезвычайно важный результат — создание блоковой версии алгоритма Витерби (БАВ) со сложностью, близкой к сложности классического АВ для свёрточных кодов, которую автор книги также, как и многие другие достижения, своевременно запатентовал. Этот результат для одного из самых главных алгоритмов прошлого века впечатляет и сам по себе, так как оценки сложности «прежней» теории кодирования для блоковых версий АВ фактически соответствуют удвоенному показателю экспоненты сложности по сравнению со свёрточными кодами, что, конечно, делало их совершенно недоступными для применения в реальных системах. Нелишне подчеркнуть, что школа ОТ давно и успешно развивает теперь уже и это направление прикладной теории кодирования, которое тоже было незаслуженно забыто прежней «классической» теорией на фоне турбо и прочих «достижений» теоретиков.

Во всех монографиях по МПД и ОТ для иллюстрации многих результатов МПД алгоритмов уже неоднократно использовались возможности сетевых порталов www.mtdbest.ru и www.mtdbest.iki.rssi.ru научной школы автора, первый из которых достаточно часто обновляется. Это многократно облегчает правильное понимание результатов ОТ. Использование ресурсов этих порталов в данной монографии называется ещё более разнообразным и полным. На этих веб-сайтах,

с общим числом информационных блоков более 600, представлено большое число демо-программ по всем наиболее известным в мире алгоритмам декодирования. Эти тематические двуязычные порталы посещают свыше 100 тысяч читателей в год из более 90 стран мира, что особенно хорошо и точно характеризует полное и безусловное признание мировым научно-техническим сообществом технологий и парадигм ОТ и её результатов.

Более того, представленные на первом из указанных сетевых ресурсов специальные программные платформы действительно позволяют любому специалисту быстро перейти к полноценной научной работе в сфере ОТ.

Автор монографии является лауреатом премии Правительства РФ по науке и технике. Европейский союз (ЕС) наградил создателя ОТ Золотой медалью «За исключительные достижения», которая в Европе вручается только за самые выдающиеся научные результаты. А на недавней Международной выставке изобретений ему была вручена Золотая медаль за патент на сверхскоростной МПД декодер. Что же касается уровня текущей и далеко не современной теории кодирования как у нас в стране, так и в зарубежье, то единый общий драматический диагноз её состояния обусловлен крайне странным для цифровой цивилизации обстоятельством. Дело в том, что никакие главные характеристики эффективных декодеров никто не умеет рассчитывать для большого уровня шума. Наверное, этого никогда и не случится ни для каких алгоритмов. Возможно, что этого нельзя сделать просто в принципе. И никто не умеет программировать! Это можно сказать практически почти про всех специалистов в области кодов. Да и лозунг конца того тысячелетия: «программирование — вторая грамотность!» — ныне давно забыт абсолютно. Всё это и стало концом «той» чисто математической теории кодирования. Но теория кодирования — это вовсе не математическая задача! Это одна из оптимизационных проблем в дискретных пространствах со структурой массивов, корректирующих ошибки. И все их главные характеристики, возможно, всегда будут определяться только экспериментально, на программных моделях и аппаратных макетах, которые обычно выдают такие результаты по характеристикам практически мгновенно. Всё это научная школа ОТ поняла более полувека назад, что и позволило ей выиграть невероятно масштабный и важнейший научный конкурс в теории информации на самом взлёте цифровизации нашего мира.

Так что декларируемый автором этой монографии в очень мягкой форме его приоритет и абсолютное мировое лидерство, оцениваемое им весьма скромно, в 20–30 лет, действительно существует, так как сейчас не видно даже на горизонте таких научных групп, которые хотя бы начали создавать для развития прикладной теории кодирования какие-либо программные оптимизирующие, моделирующие и проектирующие комплексы для исследования и конструирования новых очень быстрых оптимальных систем кодирования, работающих вблизи границы Шеннона. Действительно, только на создание такого программного обеспечения нужны, как это было и со школой ОТ, десятилетия напряжённого сложнейшего труда, что особенно подчёркивает способность предвидения будущего своей отрасли науки у автора этой книги, равной которой, может быть, не появится ещё очень долго. Трудный опыт школы ОТ свидетельствует, что, кроме решения о разработке тех или иных комплексов подобных интеллектуальных программных систем, нужны ещё также определённое время и большой накопленный личный опыт для того, чтобы понять, какими именно должны быть эти инновационные комплексы. А это тоже долгие напряженные годы очень упорной работы.

Свой обширный набор таких программных средств школа ОТ свободно предлагает всем специалистам. Этот набор, как полагает руководитель школы, будет непрерывно расширяться и становиться всё более доступным для всех.

Переходя к заключительным замечаниям об этой уникальнейшей

в теории кодирования и вообще в истории науки книге, позволю себе напомнить, что читатель держит в своих руках действительно чрезвычайно важную монографию, которая знаменует собой, наконец, состоявшийся сильно затянувшийся переход всей прикладной теории кодирования в совершенно новую фазу своего развития, ориентированную на создание действительно доступных эффективных алгоритмов коррекции ошибок гарантированного качества. Он основан на прочном союзе теории и эксперимента. Крайне жаль, что этот переход не произошёл около 30 лет назад, когда полная теория ОТ уже была создана. Она становится уже не проблемой, а технологической задачей глобальной оптимизации функционалов от очень большого числа переменных в дискретных пространствах со структурой, учитывающей свойства корректирующих кодов. Многие из рассмотренных в монографии и глубоко исследованных алгоритмов успешно работают в непосредственной близости от границы Шеннона. И очень важно, что все методы ОТ остаются хорошо известными простейшими мажоритарным декодерами с правильно подобранными параметрами или модификациями широко распространённых декодеров, работающих по алгоритму Витерби, который любят и тоже прекрасно понимают все инженеры цифровой связи.

Ситуация, сложившаяся к настоящему времени вокруг ОТ, по мнению уже немалого числа специалистов по теории кодирования, сильно напоминает состояние физики начала XX века, когда многие актуальные задачи оказалось невозможным решить имевшимися тогда у науки методами. И только появление ряда совершенно новых для физики парадигм, относящихся к принципам устройства нашего мира, сформировавших позже квантовую механику, позволило выйти на новые рубежи научного познания нашего физического мира. Целый ряд великих физиков своего времени был тогда заслуженно удостоен Нобелевской премии, хотя физика начала того века ещё довольно долго не относилась к сколько-нибудь актуальным отраслям знания. Её общественное признание состоялось уже в 30–40-х годах. Важность же ОТ, её технологий и парадигм исключительно высока потому, что она уже стала новой «квантовой механикой» в прикладной теории информации. Чрезвычайно существенно и то, что ОТ создана и уже успешно завершена во всех основных своих аспектах в самый важный период начала бурного развития нашей информационной цифровой цивилизации, которая до самого последнего времени не умела обеспечивать простыми средствами необходимую ей высокую достоверность своего информационного контента. Именно поэтому для нашего современного мира значение ОТ, очень содержательной, компактной и совершенной науки, многократно превышает значимость квантовой механики для физики, какой она была в самом начале прошлого века.

Согласимся в конце нашего вводного обзора и с тем, что такая книга о полном решении проблемы Шеннона абсолютно необычна и поэтому, конечно, совершенно неожиданна для основного контингента мировой науки, занятого вопросами кодирования. Укажем также, что уже выходят публикации с участием членов РАН и специалистов в области цифровых технологий, где они подтверждают исключительную ценность результатов автора этой монографии и полагают, что алгоритмы МПД, символные коды, а также теория размножения ошибок декодирования полностью соответствуют нобелевскому уровню исследований автора как вместе взятые, так и в отдельности. А технологии настроек параметров кодов и декодеров, алгоритмы для исправления стираний и совокупность новых парадигм ОТ, а также десятки патентов автора — большинство из них безусловно являются выдающимися открытиями в области прикладной теории кодирования. И это реально именно так, что и подтверждают сетевые порталы научной школы ОТ, которые, как я уже отмечал выше, давно читают специалисты всего мира.

Особенно наглядно совершенство ОТ подчёркивает её чрезвычайная компактность, минимальное количество формул, описывающих

возможности всех алгоритмов В.В. Золотарёва в различных каналах, и глубокая философская сущность, которая, я думаю, может обсуждаться и анализироваться историками науки ещё очень долгое время. Можно оценочно полагать, что вся ОТ имеет при этом объём, который примерно на три порядка меньше очень распухшей сейчас прежней теории, которая уже давно не приносит никаких разумных результатов, на что мы неоднократно указывали в наших новых обзорах по прикладным вопросам сферы применения теории кодирования. Своё полное удовлетворение от выхода в свет столь необычной монографии хочется выразить ещё и в связи с тем, что 2018 год оказался юбилейным для теории кодирования. Более 70 лет назад Клод Шеннон фактически поставил эту проблему простого и эффективно-го декодирования перед наукой и техникой в своей замечательной статье. Очень приятно найти её успешное во всех смыслах решение именно сейчас в монографии выдающегося российского учёного. История науки не знала до сих пор такого случая, чтобы небольшая научная школа полностью развернула в принципиально новом направлении столь грандиозную и инерционную, но одновременно и такую необходимую для техники связи сложнейшую отрасль науки, практически полностью решив все ранее сформулированные для неё прикладные проблемы. И в заключение я выражаю твёрдую уверенность, что актуальнейшие результаты ОТ — новой «квантовой механики» современной теории информации, изложенные в этой уникальной монографии, послужат масштабным достойным вкладом всей российской науки в развитие новых методов и технологий цифровой обработки данных, а также вообще всей теории информации для цифрового информационного сообщества начала нового тысячелетия.

Лауреат Государственной премии СССР,
член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки РФ,
лауреат Государственной премии,
дважды лауреат Премии Правительства РФ

Ю.Б. Зубарев

О новом формате прикладной теории кодирования

Проблема более простого обеспечения высокой достоверности передачи, обработки, хранения и восстановления цифровых данных становится всё актуальней во всем мире. Однако до последнего времени казалось, что до успешного решения задачи создания простых и высокоэффективных даже вблизи границы Шеннона декодеров разных типов, что и является главной прикладной целью теории кодирования, ещё очень далеко. В самом деле, для этого нужно было найти методы декодирования в четырёх традиционных в классической теории каналов: в двоичном симметричном, недвоичном, гауссовском и стирающем каналах, для реализации которых ранее нередко привлекались различные и нередко довольно тяжеловесные, а также далеко не самые эффективные идеи. Но все они в итоге оказывались очень трудоемкими и далёкими от того возможного уровня эффективности, оценки которого давала теория.

На фоне этого длительного кризиса совсем иначе смотрелись все эти десятилетия работы нашей научной школы Оптимизационной Теории (ОТ) помехоустойчивого кодирования, которую около полувека назад начал развивать профессор ИКИ РАН Валерий Владимирович Золотарёв. Впервые в мире поставив задачу итеративного постепенного приближения к наилучшему оптимальному по вероятности ошибки решению, он и активные последователи нашей школы начали почти сразу получать очень высокие характеристики разрабатываемых алго-

ритмов по достоверности при крайне простых схемах их реализации, что было очень естественно, так как основой новых алгоритмов, названных нами многопороговыми декодерами (МПД), стали простейшие давно известные пороговые декодеры Джеймса Мессе. А вот высокая достоверность МПД декодеров, практически совпадающая с оптимальным декодированием (ОД), что раньше обеспечивали лишь методы полного перебора, например алгоритм Витерби (АВ), — эти свойства для всё более высоких уровней шума наши декодеры в течение многих десятилетий приобретали медленно по мере развития ОТ вместе с очень разветвлённым и масштабным программным обеспечением (ПО). Очень помог быстрому улучшению характеристик наших алгоритмов рост производительности доступных нам вычислительных средств, а также непрерывно развиваемое нами оптимизационное ПО. Эта особенность исследований в нашей научной школе является важнейшей для прогресса самой теории ОТ и для получения новых результатов в области проектирования и анализа свойств алгоритмов декодирования, а также для улучшения их характеристик.

Именно при такой абсолютно нетипичной для прежней теории, но очень плодотворной постановке проблемы простой высокодостоверной передачи цифровых данных по каналам с шумом В.В. Золотарёв при участии ряда энтузиастов школы издал уже много монографий по ОТ, в которых описаны решения множества крайне сложных задач, которые обеспечили достижение алгоритмами ОТ ближайших окрестностей границы Шеннона при минимальной сложности и практически наилучшей достоверности.

Предлагаемая специалистам новая монография профессора В.В. Золотарёва излагает теорию ОТ и её самые новые прикладные достижения в сфере разработки и создания алгоритмов декодирования, обеспечивающих в случае применения МПД декодеров практически оптимальное декодирование с минимально возможной от длины кодов сложностью реализации. А при использовании блоковых модификаций АВ, как следует из представленных данных, уже достижимы и все наилучшие параметры декодирования для коротких кодов, которые теперь не доступны никаким другим алгоритмам. Это определяется тем, что только все МПД декодеры и АВ во всех своих модификациях измеряют расстояния своих решений до принятого сообщения. Опыт наших исследований свидетельствует о том, что никакие алгоритмы, лишённые таких исключительно полезных свойств, не имеют никаких перспектив достичь границы Шеннона при разумной сложности их реализации.

Таким образом, утверждение абсолютного лидерства ОТ и теперь уже окончательный «уход» с реального поля науки прежней теории произошло из-за того, что по единому критерию «помехоустойчивость — достоверность — сложность» та теория не смогла за всё время своего бытия найти аналитические выражения для каждого из этих параметров критерия в условиях большого шума канала хотя бы для одного из своих алгоритмов, претендовавших на высокие характеристики помехоустойчивости. Но развивать одновременно и теорию, и экспериментальную базу адепты прежней эры просто не смогли. А это значит, что теория кодирования в прикладном своём аспекте действительно оказалась вовсе не математической задачей. Давно осознав это, школа ОТ полностью решила проблему Шеннона для всех традиционных каналов как задачу глобальной оптимизации функционалов сложной природы в цифровых пространствах, оставшись при этом исключительно в рамках очень понятных мажоритарных алгоритмов и алгоритма Витерби. Других сопоставимых с ОТ методов за её пределами сейчас нет. Да и ожидать их появления трудно. Все характеристики алгоритмов ОТ по единому критерию сейчас являются наилучшими и мгновенно определяются при моделировании средствами нашего инновационного оптимизационного ПО, что ещё более ускоряет развитие ОТ и помогает быстро указывать ей новые точки роста.

Полезно отметить исключительную компактность ОТ и её полно-

ту. Технологии ОТ отлично работают и уже продемонстрировали высокие результаты примерно для ста различных кластеров параметров кодирования. Одна из ведущих ролей в текущем быстром прогрессе ОТ несомненно принадлежит автору этой монографии профессору В.В. Золотарёву, в которой изложены новейшие данные по фундаментальным научным и прикладным разработкам созданной им теории. Сторонники научной школы ОТ полагают, что успешная теоретическая и экспериментальная работа всех специалистов, заинтересованных в дальнейшем развитии прикладных методов кодирования, в том числе в направлениях, указанных в последних главах этой монографии, позволит и далее очень быстро продвигать технику помехоустойчивого кодирования на всё более высокие уровни технологий. Именно это и нужно от передовой теории, ставшей «квантовой механикой» современной теории информации, цифровому информационному сообществу нового тысячелетия.

Заведующий кафедрой
вычислительной и прикладной математики
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет им. В.Ф.Уткина»,
доцент, доктор технических наук,
председатель научно-методического совета РГРТУ

Г.В. Овечкин