

УДК 621.396

В.Г.Панарин, А.Г.Юрочкин  
**ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ  
ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ ПОД СТРОИТЕЛЬНЫМИ  
ЗАВАЛАМИ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**

*Воронежский институт высоких технологий*

*Воронежский филиал Российской Академии государственной службы при  
Президенте Российской Федерации*

*В статье обсуждаются проблемы обнаружения живых людей под завалами, образующимися в результате чрезвычайных ситуаций и разрушений зданий. Используется принцип Доплеровского радара, в котором при распространении электромагнитной волны в среде и попадании на исследуемый объект происходит сдвиг частоты. Считается, что человеческое тело может быть представлено в виде диэлектрического цилиндра с определенной длиной и радиусом. Он совершает колебания, обусловленные процессами дыхания. Даются оценки глубины проникновения в поглощающую среду в зависимости от частоты сигнала. На основе уравнения радиолокации показана связь между мощностью сигнала на передатчике и мощностью сигнала на приемнике. Для реальной составляющей диэлектрической проницаемости и проводимостью строительных материалов наблюдаются различные зависимости от частоты электромагнитной волны.*

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, поглощение радиоволн, эффект Доплера, обнаружение людей.

При работе спасательных служб весьма важной задачей является увеличение вероятности обнаружения людей под разрушенными зданиями, в течение кратчайшего времени, например, после сильного землетрясения. В чрезвычайных ситуациях требуется, чтобы местоположение людей под завалом было определено как можно точнее, чтобы этим воспользовались службы спасения.

В течение последних лет исследователями было предложено использовать Доплеровский радар для того, чтобы обнаружить оставшихся в живых людей, попавших в замкнутое пространство под развалившимися зданиями [1,2]. Но на практике примеров работы с такими обнаружителями относительно немного.

Даже когда человек находится без сознания, внутренние органы и все его тело находятся в непрерывном колебательном движении.

Когда электромагнитной волны с частотой  $f_0$  попадают на движущийся объект (в данном случае бьющееся сердце или двигающуюся грудь человека, находящегося под завалом), то частота рассеянного сигнала имеет Доплеровский сдвиг, который пропорционален относительной радиальной скорости объекта  $v_{rad}$  по отношению к передатчику, при этом используется следующее соотношение:

$$f_{dop} = \frac{v_{rad}}{c} f_0, (1)$$

где  $c$  – скорость света в анализируемой среде.

Будем считать, что человеческое тело совершает колебания с определенной частотой  $\omega$ . Тогда радиальная скорость задается следующим образом:

$$v_{rad} = v_{rad0} \cos(\omega t). (2)$$

Доплеровский сдвиг по частоте определяется так:

$$f_{dop} = 2 \frac{v_{rad0}}{c} f_0 \cos(\omega t). (3)$$

Это означает, что  $f_{dop}$  имеет колебательный характер, но период при этом постоянен. Тогда отраженный сигнал, приходящий на приемник, будет иметь частоту  $f_{dop} + f_0$  и низкочастотная составляющая сигнала записывается следующим образом:

$$S(t) = \beta \cos(2\pi f_{dop} t). (4)$$

После подстановки  $f_{dop}$ :

$$S(t) = \beta \cos\left(4\pi \frac{v_{rad0}}{c} f_0 \cos(\omega t) t\right). (5)$$

При работе радара, предназначенного для поиска людей, наиболее важным параметром является глубина проникновения сигнала. В [3-6] дано рассмотрение различных методов, которые могут быть полезными при анализе распространения электромагнитных волн.

Самым сложным случаем с точки зрения возможности проникновения электромагнитных волн материалом является бетон, армированный железом. Если проводить анализ для металлических конструкций, то проникновение электромагнитных волн становится невозможным.

Глубина проникновения в поглощающее полупространство с потерями может быть вычислена с помощью уравнения [7, 8]:

$$\delta = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{\omega \sqrt{\epsilon \mu} \sqrt{0.5 \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2} - 1 \right)}}, (6)$$

где  $\sigma$  – проводимость среды (в нашем случае мы рассматриваем преимущественным образом бетон),  $\mu$  – магнитная проницаемость,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды. Необходимо отметить, что глубина проникновения электромагнитной волны в материал обратно пропорциональна частоте.

Обычно для бетона значения проводимости составляют порядка  $\sigma = 10^{-3} - 10^{-1}$  См/м, а относительная диэлектрическая проницаемость находится в пределах  $\varepsilon = 6 - 12$ , конкретные величины определяются главным образом процента влажности бетона и глубиной его ниже уровня земли [9].

Следует отметить, что модель радиальной скорости, которая нами рассматривалась как зависящая по гармоническому закону от частоты, определяется на основе упрощенных предположений.

В реальности ни движение грудной клетки, обусловленное дыхательными процессами, ни биение сердца не подчиняется синусоидальному закону. Даже при аппроксимации синусоидой, параметры будут варьироваться от одного человека к другому.

Кроме того, они могут меняться для одного и того же человека в различные моменты времени. Например, если человек испуган, то он может дышать быстрее, таким образом, это определяет большие значения частоты  $\omega$ . Если же человек успокаивается через некоторое время, то значение  $\omega$  уменьшается. Кроме того, положение тела относительно падающей электромагнитной волны играет важную роль при оценке амплитуды сигнала. Если рассматривается движение, которое будет перпендикулярным к волновому вектору распространяющегося сигнала, то радиальная скорость стремится к нулю.

Еще одним фактором, который может значительно ухудшить работу алгоритма обнаружения людей, являются потери при распространении электромагнитной волны [10-13].

Большинство материалов, которые используются при строительстве зданий, характеризуются поглощающими способностями, что может привести к настолько сильному ослаблению сигналов, что они могут оказаться неотличимыми от шумов. Если здания сделаны из кирпича или древесины, то сквозь них довольно легко проникают электромагнитные волны, в отличие от бетонных конструкций.

Анализ разрушенных зданий показывает, что развалины состоят из чередующихся слоев бетона и других материалов (кирпич и составляющие мебели). Люди могут находиться под несколькими слоями бетона, что затрудняет распространение электромагнитной волны к тем, кого необходимо спасти, а затем в обратном направлении к приемной антенне. С другой стороны, если есть трещины в бетонных плитах или любых

строительных конструкциях, то это облегчает распространение электромагнитных волн через них.

Другие факторы также могут влиять на работу системы поиска людей: даже незначительные движения антенны могут произвести такой сильный сигнал, что возникают условия, при которых нет возможности различать сигналы от различных объектов, в том числе и полезные сигналы.

Случайные переотражения могут привести к ситуации ложного обнаружения. Существующий стохастический характер сигналов ведет к тому, что трудно получить критерий автоматического обнаружения объекта. Из этого следует, что опыт операторов, работающих на практике с системой поиска людей играет важную роль в принятии решения по наличию людей под завалами.

Сделаем оценку параметров, которые будут оказывать влияние влияющие на чувствительность устройств, относительно простым случаем является распространение электромагнитной волны в свободном пространстве, более сложная ситуация - когда люди располагаются за преградой, которая представляет собой диэлектрическую среду, имеющую потери.

Так как основной целью разработки алгоритмов является проведение обнаружения живых людей, то следует учитывать сигнал дыхания, поскольку он имеет амплитуду колебания, которая намного больше, чем сигнал сердцебиения.

Анализ показывает, что в практических случаях фронт волны не является плоским, расходится в пространстве, это определяется свойствами передающей и приемной антенн, в этой связи можно сделать оценку потерь принимаемого сигнала.

Если рассматривать уравнение радиолокации [14], то

$$P_2 = \frac{P_1 \gamma \alpha \sigma}{(4\pi)^2 R^4} = \frac{P_1 \alpha^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 R^4}, (7)$$

где  $P_1$  – мощность на передающем устройстве,  $\alpha$  – является эффективной площадью антенны,  $\gamma = (4\pi/\lambda^2)\alpha$  – является коэффициентом усиления антенны,  $\sigma$  – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) анализируемого объекта,  $R$  – расстояние до объекта.

Существует связь между коэффициентом усиления антенны  $\gamma$  и коэффициентом направленного действия антенны  $\gamma_1$ , выражаемая следующим соотношением:  $\gamma = \gamma_1 \eta$ , где  $\eta$  – коэффициентом полезного действия (КПД) антенны, в нем происходит учет потерь в ней мощности по сигналу передающего устройства [14].

Коэффициент направленного действия антенны определяет направленные характеристики антенны и он является числом, демонстрирующим, во сколько раз мощность сигнала, который принимается антенной, превышает мощность, которую будет принимать эталонная антенна (являющаяся полуволновым вибратором). Существует приближенное выражение для коэффициента направленного действия антенны

$$\gamma_1 = 41200 \frac{k^2}{FS}, (8)$$

где  $k$  – является коэффициентом, равным  $1^\circ$ ;  $F$  – является шириной диаграммы направленности антенны, которая рассматривается в горизонтальной плоскости, в градусах;  $S$  – является шириной диаграммы направленности антенны, которая рассматривается в вертикальной плоскости, в градусах. Например, если  $F = S = 55^\circ$ ,  $\gamma_1 = 13.96$ ,  $G = 13.96 \cdot 0,95 = 12.5$ .

Если проводить аппроксимацию поверхности тела человека, то его можно представить как диэлектрический цилиндр, имеющий определенную длину  $L$  и радиус  $r$ . Падение электромагнитной волны под углом  $\pi/2$  к боковой стороне цилиндра дает такое значение ЭПР:  $\sigma = 2\pi r L^2 / \lambda$  [15].

Так как в качестве основной характеристики мы решили рассматривать закономерности того, как перемещается грудная клетка человека при дыхательных процессах, то будем считать  $r = 0,25$  м,  $l = 1,5$  м; тогда  $\sigma = 0,375\pi / \lambda$  и формулу для мощности на приемнике мы перепишем следующим образом:

$$P_2 = \frac{0.29 P_1 \alpha^2}{\pi \lambda^3 R^4}, (9)$$

Проводя анализ данной формулы, можно увидеть, что электромагнитная волна, приходящая на приемник, имеет ослабление обратно пропорционально  $r^4$ , при уменьшении длины волны будет происходить рост ее значения согласно  $1/\lambda^3$ .

Если мы при решении задачи учтем, что между передатчиком и объектом (человеком) находится поглощающая среда (материал завала, под которым находится спасаемый), то закономерности распространения электромагнитной волны будут другими.

Для мощностей записывается соотношение

$$P_2 = \tau P_1, (10)$$

где  $\tau$  – коэффициент поглощения, который определяется различными характеристиками завала.

Для того, чтобы определить коэффициент  $\tau$  требуется осуществить расчет потерь электромагнитных волн, когда они проходят через диэлектрическую среду завала, при этом требуется знать характеристики соответствующих строительных материалов, которые имеют разную плотность и влажность в зависимости от того, какова частота волны.

По мере того, как частота растет, реальная составляющая диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  уменьшается, хотя при этом могут наблюдаться локальные экстремумы для длин волн, которые относятся к нескольким десяткам сантиметров. В свою очередь, для проводимости  $\sigma$  происходит постепенный рост по мере увеличения частоты, это происходит вследствие того, что в большей мере влияет сквозная проводимость.

Тогда, по мере того, как происходит увеличение частоты  $f$  электромагнитной волны, сначала для тангенса угла потерь  $\text{tg}\delta$  наблюдается убывание, а затем постепенный рост [15].

Более явно эти эффекты проявляются для влажных материалов. Исходя из этого, мы можем полагать, что коэффициент затухания для диэлектрической среды растет при увеличении частоты и у него слабая зависимость от того, как изменяются значения  $\text{tg}\delta$  и  $\epsilon'$  для гигагерцового диапазона.

Рассмотренные модели могут быть использованы при процессах автоматизированного проектирования соответствующих электродинамических систем [16], причем, существуют условия для ускорения вычислений [17-19].

Заключение. Проведен анализ особенностей решения задачи при моделировании процессов электромагнитных волн в системах, предназначенных для спасения людей под строительными завалами. Приведены закономерности изменения характеристик материалов в зависимости от частоты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Легошин М. Л. Способ обнаружения живых объектов и устройство для его осуществления// Патент РФ на изобретение № 2141119. 1999.
2. Tahar J.B.H. Microwave life detector for buried victims / J.B.H.Tahar, J.Ch.Bolomey, M.Cauterman // Proceedings of the 23rd European microwave conference, Madrid, Spain, 1993. pp. 263-265.

3. Косилов А.Т. Методы расчета радиолокационных характеристик объектов / А.Т.Косилов, А.П.Преображенский // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2005. Т. 1. № 8. С. 68-71.
4. Болучевская О.А. Свойства методов оценки характеристик рассеяния электромагнитных волн / О.А.Болучевская, О.Н.Горбенко // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2013. № 3. С. 4.
5. Максимова А. А. Методы исследования характеристик рассеяния электромагнитных волн объектами / А. А. Максимова, А. Г. Юрочкин // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 16. С. 53-56.
6. Максимова А.А. Моделирование рассеяния электромагнитных волн на неоднородных магнито-диэлектрических телах / А.А.Максимова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2015. № 4. С. 11.
7. Милошенко О.В. Методы оценки характеристик распространения радиоволн в системах подвижной радиосвязи / О.В.Милошенко // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 60-62.
8. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М.Бреховских // М.:Наука, 1973, 343 с.
9. <http://weldworld.ru/theory/summary/otnositelnaya-dielektricheskaya-pronicaemost.html>
10. Кульнева Е.Ю. О характеристиках, влияющих на моделирование радиотехнических устройств / Е.Ю.Кульнева, И.А.Гащенко // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5-2. С. 50.
11. Мишин Я.А. О системах автоматизированного проектирования в беспроводных сетях / Я.А.Мишин // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2013. № 10. С. 153-156.
12. Головинов С.О. Проблемы управления системами мобильной связи / С.О.Головинов, А.А.Хромых // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 13-14.
13. Баранов А.В. Проблемы функционирования mesh-сетей / А.В.Баранов // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 49-50.
14. Фрадин А. Ф.Измерение параметров антенно-фидерных устройств / А. Ф. Фрадин, Е. В. Рыжков // М.: Связьиздат, 1962. 316 с.
15. Кобак В. О. Радиолокационные отражатели / В.О.Кобак // М.: Советское радио, 1975. 348 с.
16. Львович И.Я. Разработка информационного и программного обеспечения САПР дифракционных структур и радиолокационных

- антенн / И.Я.Львович, А.П.Преображенский // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2006. Т. 2. № 12. С. 63-68.
17. Часовской А. А. Оценка перспектив внедрения облачных вычислений на предприятиях и в государственном секторе на примере ФРГ / А. А. Часовской, Е. В. Алференко // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 16. С. 94-97.
18. Мохаммад М.И. О реализации концепции рекурсивно-параллельного программирования / М.И.Мохаммад, А.В.Данилова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2016. № 2. С. 16.
19. Лавлинская О. Ю. Технологии облачных вычислений и их применение в решении практических задач / О. Ю. Лавлинская, Т. М. Янкис // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 16. С. 33-36.

V.G. Panarin, A.G.Yurochkin

**THE PROBLEMS OF MODELING OF PROCESSES OF  
DETECTING PEOPLE UNDER THE RUBBLE OF THE BUILDING IN  
EMERGENCY SITUATIONS**

*Voronezh Institute of high technologies*

*Voronezh branch of the Russian Academy of state service under the  
President of the Russian Federation*

*The paper discusses the problem of detection of alive people under the rubble, formed as a result of emergency situations and destruction of buildings. It uses the principle of Doppler radar, where the propagation of electromagnetic wave in the environment and in contact with the object under study is the frequency shift. It is believed that the human body can be represented as a dielectric cylinder of finite length and radius. It oscillates, due to the process of breathing. Presents the estimates of the penetration depth in the absorbing medium, depending on the frequency of the signal. Based on the equation of radar shows the relationship between the signal power at the transmitter and the signal power at the receiver. For the real component of the dielectric permittivity and conductivity of building materials, there are different according to the frequency of the electromagnetic wave.*

**Keywords:** remote sensing, absorption of radio waves, the Doppler effect, detection of people.



## REFERENCES

1. Legoshin M. L. Sposob obnaruzheniya zhivyykh ob"ektov i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya // Patent RF na izobretenie No. 2141119. 1999.
2. Tahar J.B.H. Microwave life detector for buried victims / J.B.H.Tahar, J.Ch.Bolomey, M.Cauterman // Proceedings of the 23rd European microwave conference, Madrid, Spain, 1993. pp. 263-265.
3. Kosilov A.T. Metody rascheta radiolokatsionnykh kharakteristik ob"ektov / A.T.Kosilov, A.P.Preobrazhenskiy // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2005. T. 1. No. 8. pp. 68-71.
4. Boluchevskaya O.A. Svoystva metodov otsenki kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln / O.A.Boluchevskaya, O.N.Gorbenko // Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. 2013. No. 3. pp. 4.
5. Maksimova A. A. Metody issledovaniya kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln ob"ektami / A. A. Maksimova, A. G. Yurochkin // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 16. pp. 53-56.
6. Maksimova A.A. Modelirovanie rasseyaniya elektromagnitnykh voln na neodnorodnykh magnito-dielektricheskikh telakh / A.A.Maksimova // Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. 2015. No. 4. pp. 11.
7. Miloshenko O.V. Metody otsenki kharakteristik rasprostraneniya radiovoln v sistemakh podvizhnoy radiosvyazi / O.V.Miloshenko // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2012. No. 9. pp. 60-62.
8. Brekhovskikh L.M. Volny v sloistyykh sredakh / L.M.Brekhovskikh // M.:Nauka, 1973, 343 p.
9. <http://weldworld.ru/theory/summary/otnositelnaya-dielektricheskaya-pronicaemost.html>
10. Kul'neva E.Yu. O kharakteristikakh, vliyayushchikh na modelirovanie radiotekhnicheskikh ustroystv / E.Yu.Kul'neva, I.A.Gashchenko // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2014. No. 5-2. pp. 50.
11. Mishin Ya.A. O sistemakh avtomatizirovannogo proektirovaniya v besprovodnykh setyakh / Ya.A.Mishin // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2013. No. 10. pp. 153-156.
12. Golovinov S.O. Problemy upravleniya sistemami mobil'noy svyazi / S.O.Golovinov, A.A.Khromykh // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2012. No. 9. pp. 13-14.

13. Baranov A.V. Problemy funktsionirovaniya mesh-setey / A.V.Baranov // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2012. No. 9. pp. 49-50.
14. Fradin A. F. Izmerenie parametrov antenno-fidernykh ustroystv / A. F. Fradin, E. V. Ryzhkov // M.: Svyaz'izdat, 1962. 316 p.
15. Kobak V. O. Radiolokatsionnye otrazhateli / V.O.Kobak // M.: Sovetskoe radio, 1975. 348 p.
16. L'vovich I.Ya. Razrabotka informatsionnogo i programmnoho obespecheniya SAPR difraktsionnykh struktur i radiolokatsionnykh antenn / I.Ya.L'vovich, A.P.Preobrazhenskiy // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2006. T. 2. No. 12. pp. 63-68.
17. Chasovskoy A. A. Otsenka perspektiv vnedreniya oblachnykh vychisleniy na predpriyatiyakh i v gosudarstvennom sektore na primere FRG / A. A. Chasovskoy, E. V. Alferenko // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 16. pp. 94-97.
18. Mokhammad M.I. O realizatsii kontseptsii rekursivno-parallel'nogo programmirovaniya / M.I.Mokhammad, A.V.Danilova // Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. 2016. No. 2. pp. 16.
19. Lavlinskaya O. Yu. Tekhnologii oblachnykh vychisleniy i ikh primeneniye v reshenii prakticheskikh zadach / O. Yu. Lavlinskaya, T. M. Yankis // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 16. pp. 33-36.