

8. Hammer J. Robust stabilisation of non-linear systems. *Int. J. Control*, 1989, vol. 49, no. 2, pp. 629–653.
9. Chan J.-T., Wei L.-F. Adaptive multi-channel signal tracking controller for minimum or nonminimum phase systems. *Int. J. Control*, 1989, vol. 50, no. 1, pp. 65–73.
10. Rao S.K., Chen C.-T. Design of minimal-degree compensators with assignable poles or structure. *Automatica*, 1987, vol. 23, no. 2, pp. 241–245.
11. Lee H.G., Aropostathis A., Mareus S.I. Linearisation of discrete-time systems. *Int. J. Control*, 1987, vol. 45, no. 5, pp. 1803–1822.
12. Roppenecker G., Lohmann B. Full modal synthesis of independent control [Vollständige Modale Synthese von Entkopplungsregelungen]. *Automatisierungstechnik*, 1988, vol. 36, no. 11, pp. 434–441.
13. Malyshenko A.M. *Opreделение indeksov kauzalnosti upravlyayemykh dinamicheskikh sistem* [Determination of causality indexes of controlled dynamic systems]. *Izvestiya SA USSR. Technical cybernetics*, 1990, no. 1, pp. 32–36.
14. Streits V. *Metod prostranstva sostoyaniy v teorii diskretnykh lineynykh system upravleniya* [Method of state spaces in theory of digital linear control systems]. Moscow, Nauka, 1985. 296 p.
15. Hirschorn R.M., Davis J.H. Global output tracking for nonlinear systems. *SIAM J. Control and Optimization*, 1988, vol. 26, no. 6, pp. 1321–1330.
16. Malyshenko A.M. *Sistemy avtomaticheskogo upravlenniya s izbytochnoy razmernostyyu vektora upravleniya* [Automatic control systems with redundant dimension of control vector]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2005. 302 p.
17. Malyshenko A.M., Rybakov E.A., Kochetkova E.A. *Program-mnoe obespechenie dlya rascheta indeksov kauzalnosti lineynykh vkhod-vykhodnykh dinamicheskikh sistem* [Software for calculating causality indexes of linear input-output dynamic systems]. State registration certificate of computer program № 2013619662, 2011.
18. Grasse K.A. Sufficient conditions for the functional reproducibility of time-varying, input-output systems. *SIAM J. Control and Optimization*, 1988, vol. 26, no. 1, pp. 230–249.
19. Wohltmann H.-W. A note Aoki's conditions for path controllability of continuous-time dynamic economic systems. *Review of Economic Studies*, 1984, vol. 51, no. 2, pp. 343–349.
20. Malyshenko A.M. *Opreделение indeksov kauzalnosti, strukturykh upravlyaemosti, dostizhimosti i vosstanavleваемости lineynykh dinamicheskikh system* [Definition of causality indices, structural features of controllability, observability, reachability and restorability of linear dynamic systems]. *Siberian Journal of Science*, 2011, no. 1 (1), pp. 374–378. URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/77/124> (accessed 12 November 2013).

УДК 621.396.969

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ СОВРЕМЕННЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ПАССИВНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Е.В. Рогожников, Д.Н. Ушарова, А.В. Убайчин

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
E-mail: udzhon@mail.ru

Рассматриваются особенности использования сигналов современных телекоммуникационных систем в пассивных радарх. В качестве зондирующих могут быть использованы сигналы современных систем связи 4-го поколения, WiMAX, LTE, а также сигналы цифрового телевидения по стандарту DVB-T2. Рассмотрена структура кадров перечисленных систем, приведены основные параметры сигналов, такие как полоса, длительность импульса, мощность на выходе передатчика, диапазон частот, в котором работает система. Приведены основные факторы, влияющие на дальность действия системы, а также значения эффективной поверхности рассеяния целей, которые могут быть обнаружены. Получены зависимости дальности действия системы от эффективной поверхности рассеяния цели при работе по сигналам WiMAX, LTE и DVB-T2. Описаны достоинства и недостатки сигналов перечисленных систем при использовании их в пассивных радарх.

Ключевые слова:

Телекоммуникационная система, пассивная радиолокационная система, дальность действия, структура кадра, сигнал синхронизации, эффективная поверхность рассеяния, разрешающая способность по дальности.

Введение

Поверхность планеты окружает огромное множество радиосигналов различного назначения: радиовещание, сотовая связь, телевидение, сигналы спутниковой навигации, сигналы радиорелейных линий связи. Передача телекоммуникационных и других перечисленных сигналов осуществляется по беспроводным каналам связи, в результате чего при распространении сигналы отражаются от множества объектов на трассе распространения. Таким образом, сигналы известных источников могут быть использованы для получения радиолокационной информации в

пассивных радиолокационных системах. Для использования в пассивных радиолокационных системах сигналы перечисленных выше источников должны обладать следующими характеристиками:

- для выполнения обнаружения сигналы должны быть известными, для достаточной разрешающей способности по времени сигналы должны иметь полосу более 1 МГц;
- системы, сигналы которых используются в пассивной системе радиомониторинга, должны иметь антенны с широкой диаграммой направленности;

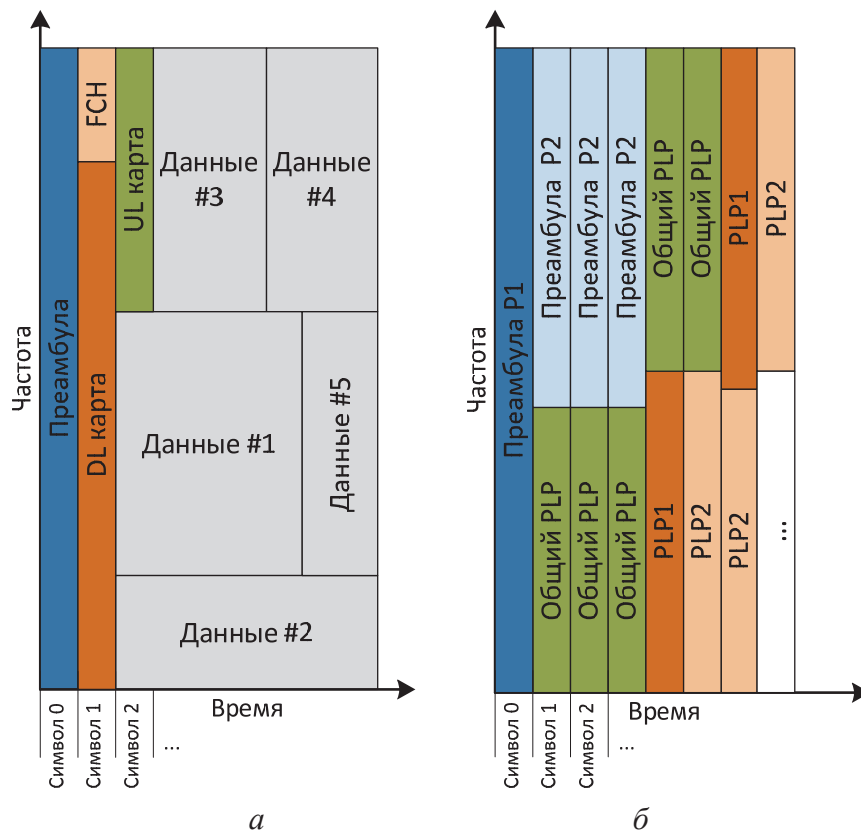


Рис. 1. Структура нисходящего кадра: а) Wi-Max [1]; б) DVB-T2 [2]. а) Преамбула – известная последовательность, используемая для синхронизации; FCH – управляющий заголовок кадра; DL карта – карта распределения полей нисходящего канала; UL карта – карта распределения полей восходящего кадра; Данные – пользовательские данные передаваемые в сети; б) Преамбула P1 служит для синхронизации, идентификации кадра DVB-T2; Преамбула P2 содержит информацию о кадре (длина, модуляция, скорость кодирования и т. д.); PLP – это физический канал, который может передавать один или несколько сервисов

- мощность на выходе передающей антенны должна быть достаточно высокой, для того чтобы сигналы, отраженные от цели, могли быть идентифицированы;
- координаты источника радиоизлучения должны быть известны.

Критериям удовлетворяют лишь сигналы сотовой связи и сигналы цифрового телевидения.

Параметры исследуемых сигналов

Рассмотрим сигналы современных систем связи 4-го поколения: WiMAX, LTE, а также сигналы цифрового телевидения по стандарту DVB-T2.

На рис. 1, 2 приведены структуры кадров пере-
численных систем.

На рис. 2 приведена структура подкадра системы LTE [3].

Служебные данные включают в себя каналы управления передачи данных, опорные сигналы и др. Канал первичной синхронизации используется для идентификации кадра и временной синхронизации, канал вторичной синхронизации используется для определения идентификатора соты. Канал первичной и вторичной синхронизации занимает 1,4 МГц (62 поднесущие + защитные интервалы) и не зависит от используемой в системе полосы частот.

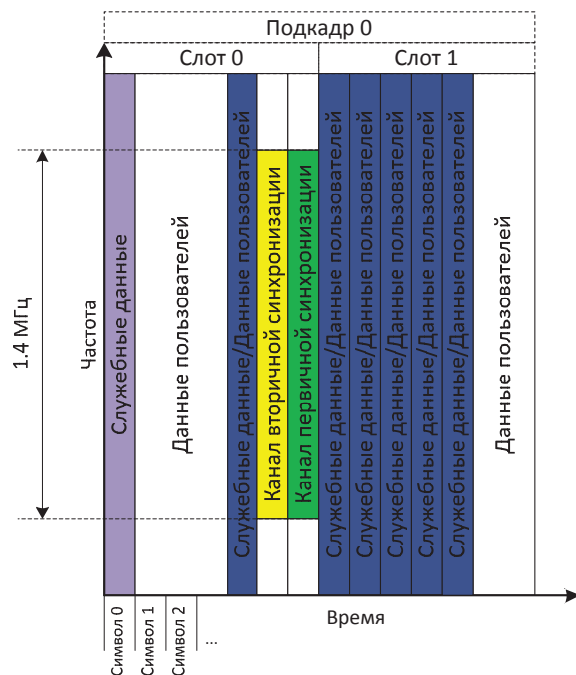


Рис. 2. Структура подкадра LTE

Для работы пассивной радиолокационной системы применимы следующие сигналы: преамбула Wi-MAX, преамбула P1 цифрового телевидения по стандарту DVB-T2, а также канал первичной синхронизации LTE, поскольку эти сигналы являются известными и обладают хорошими корреляционными свойствами. В табл. 1 приведены основные параметры перечисленных сигналов.

Таблица 1. Параметры сигналов рассматриваемых телекоммуникационных систем

	3GPP LTE	WiMAX [4]	DVB-T2 [5, 6]
Диапазон частот (зависит от страны)	2,5 ГГц	2,4 ГГц	174–834 МГц
Полоса сигнала (МГц)	1,4	1,75–28	8
Мощность сигнала (Вт)	20	20 [5]	50
Длительность импульса	71 мкс	72 мкс–1,14 мс [1]	0,1–3,5 мс
Максимальная длительность кадра (подкадра) (мс)	5	20	8–250

Дальность действия системы

Рассмотрим дальность действия пассивной радиолокационной системы в том случае, если приемный пункт и источник сигнала находятся в одном пункте (не разнесены), при этом источником излучаются сигналы описанных выше телекоммуникационных систем.

Дальность действия системы в свободном пространстве определяется выражением [7]:

$$R_0 = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{изл}} G_{\text{пер}} \sigma_{\text{ц}} S_{\text{а}}}{(4\pi)^2 P_{\text{пр_мин}} L_n}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{изл}}$ – мощность излучаемого сигнала; $G_{\text{пер}}$ – коэффициент усиления передающей антенны; $\sigma_{\text{ц}}$ – эффективная поверхность рассеяния цели (ЭПР);

$S_{\text{а}} = \frac{G_{\text{пр}} \lambda^2}{4\pi}$ – эффективная площадь приемной антенны; $G_{\text{пр}}$ – коэффициент усиления приемной антенны; λ – длина волны; $P_{\text{пр_мин}} = k_{\text{р}} P_{\text{ш}}$ – минимальная принимаемая мощность для выполнения кри-

терия обнаружения; $k_{\text{р}} = \frac{q_{\text{мин}}^2}{2\Delta f \tau_{\text{и}} N}$ – коэффициент

различимости; $q_{\text{мин}}$ – параметр обнаружения, равный минимальному отношению сигнал/шум на выходе фильтра, согласованного с обнаруживаемым сигналом; Δf – эффективная полоса приемника; $\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса; N – количество накапливаемых импульсов; $P_{\text{ш}} = k_{\text{ш}} T_0 k \Delta f$ – мощность шума; T_0 – нормальная температура (290 К); $k_{\text{ш}}$ – коэффициент шума приёмного тракта; k – постоянная Больцмана; L_n – дополнительные потери в системе при передаче и обработке сигнала.

Параметр обнаружения $q_{\text{мин}}$ зачастую определяется графически (рис. 3), исходя из вероятности правильного обнаружения D и ложной тревоги F [8].

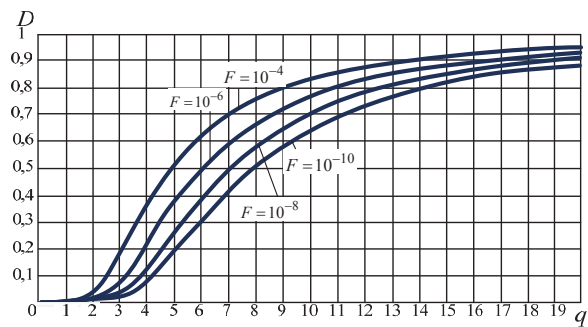


Рис. 3. Зависимость вероятности правильного обнаружения от параметра обнаружения q при заданной вероятности ложной тревоги

Преобразуем выражение (1) к виду:

$$R_0 = \sqrt[4]{\frac{2P_{\text{имп}} \tau_{\text{и}} N G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \sigma_{\text{ц}} \lambda^2}{(4\pi)^3 q_{\text{мин}}^2 k_{\text{ш}} T_0 k L_n}}.$$

Дальность действия системы также ограничивает затухание радиоволн в атмосфере, вызванное поглощением и рассеянием радиоволн гидрометеорами (дождь, снег, туман, град), а также поглощение радиоволн молекулами газов, составляющих воздух. С учетом затухания радиосигнала в атмосфере дальность действия системы определяется выражением [8]:

$$R_{\text{max}} = R_0 \cdot 10^{(-0,05 \cdot \alpha \cdot R_{\text{max}})}, \quad (2)$$

где R_0 – дальность действия системы в свободном пространстве; α – удельный коэффициент затухания (дБ/км).

Выразить из уравнения (2) R_{max} через дальность действия системы в свободном пространстве R_0 и коэффициент затухания α невозможно. Поэтому при практических расчетах пользуются семейством кривых $R_{\text{max}0} = f(R_{\text{max}}, \alpha)$, рис. 4, а.

Из рис. 4, б следует, что на исследуемых частотах коэффициент затухания α составляет порядка 0,01 дБ/км, при дальности действия пассивной радиолокационной системы до 60 км оно не окажет существенного влияния (рис. 4, а).

Помимо перечисленных факторов, одним из основных, влияющих на дальность действия системы, является эффективная поверхность рассеяния цели (ЭПР). Средние значения ЭПР типовых целей приведены в табл. 2.

Таблица 2. Среднее значение ЭПР типовых целей [9]

Пример радиолокационной цели	Средняя ЭПР, м ²
Крылатая ракета	0,1
Истребитель	0,4...1
Средний реактивный пассажирский самолет	40
Большой пассажирский самолет	100
Вертолет	3
Автомобиль	10...50
Велосипед	2
Человек	1
Птица	10 ⁻² ...10 ⁻³

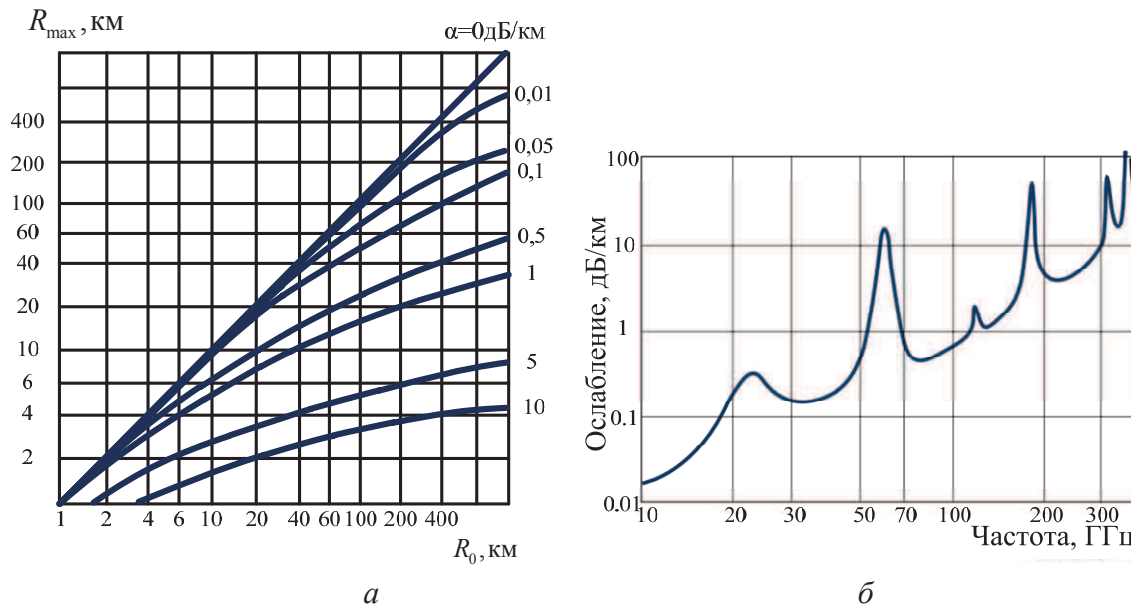


Рис. 4. Зависимости: а) дальности действия системы от коэффициента затухания [7]; б) коэффициента затухания от частоты сигнала

Параметры, используемые для расчета дальности действия системы, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры системы

	WiMax	LTE	DVB-T2
Излучаемая мощность (Вт)	15	15	50
Коэффициент усиления передающей антенны (дБ)	15	15	15
ЭПР цели	0,8–40	0,8–40	0,8–40
Несущая частота	2,4 ГГц	2,5 ГГц	834 МГц
Коэффициент усиления приемной антенны (дБ)	15	15	15
Параметр обнаружения $q_{\min}$	10	10	10
Эффективная полоса приемника (МГц)	28	1,4	8
Длительность импульса (макс.)	1,14 мс	71 мкс	3,5 мс
Коэффициент шума приемного тракта (дБ)	2	2	2
Дополнительные потери в системе при передаче и обработке сигнала (дБ)	5	5	5

Зависимости дальности действия системы от ЭПР цели приведены на рис. 5.

Одной из важных характеристик системы является разрешающая способность по дальности. Разрешающая способность по дальности – минимальное расстояние между объектами, при котором дальность до каждого из них может быть измерена отдельно [8]. Разрешающая способность по дальности зависит от полосы используемого сигнала.

$$\Delta R = \frac{c \cdot \Delta \tau}{2} = \frac{c}{2 \cdot \Delta f},$$

где ΔR – разрешающая способность по дальности; c – скорость света; $\Delta \tau$ – разрешающая способность по времени; Δf – полоса сигнала.

Результаты расчета разрешающей способности и дальности действия системы приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты расчета разрешающей способности и дальности действия системы

Сигнал	3GPP LTE	WiMAX	DVB-T2
Полоса сигнала (МГц)	1,4	28	8
Разрешающая способность (м)	107,14	5,3	18,7
Дальность действия системы (ЭПР цели 40 м²) (м)	6000	7200	19000
Частота повторения сигнала (Гц)	200	50	4...125

Выводы

В статье рассматриваются особенности использования сигналов современных телекоммуникационных систем в пассивных радиолокационных системах. В связи с тем, что сигналы цифрового телевидения по стандарту DVB-T2 имеют большую длительность и при этом наибольшее значение мощности передатчика, они обеспечивают максимальную потенциальную дальность действия системы, при не самой лучшей разрешающей способности по дальности в 18,7 м. Сигналы WiMAX имеют максимальную полосу среди сравниваемых систем и обеспечивают наилучшую разрешающую способность по дальности в 5,3 м. Дальность действия системы, использующей сигналы LTE и WiMAX, примерно одинакова и ограничивается мощностью базовой станции и длительностью сигнала, однако использование сигналов LTE значительно ограничивает разрешающую способность по дальности, поскольку полоса сигнала синхронизации LTE составляет 1,4 МГц. При этом сигнал синхронизации LTE имеет наибольшую из рассматриваемых сигналов частоту повторения.

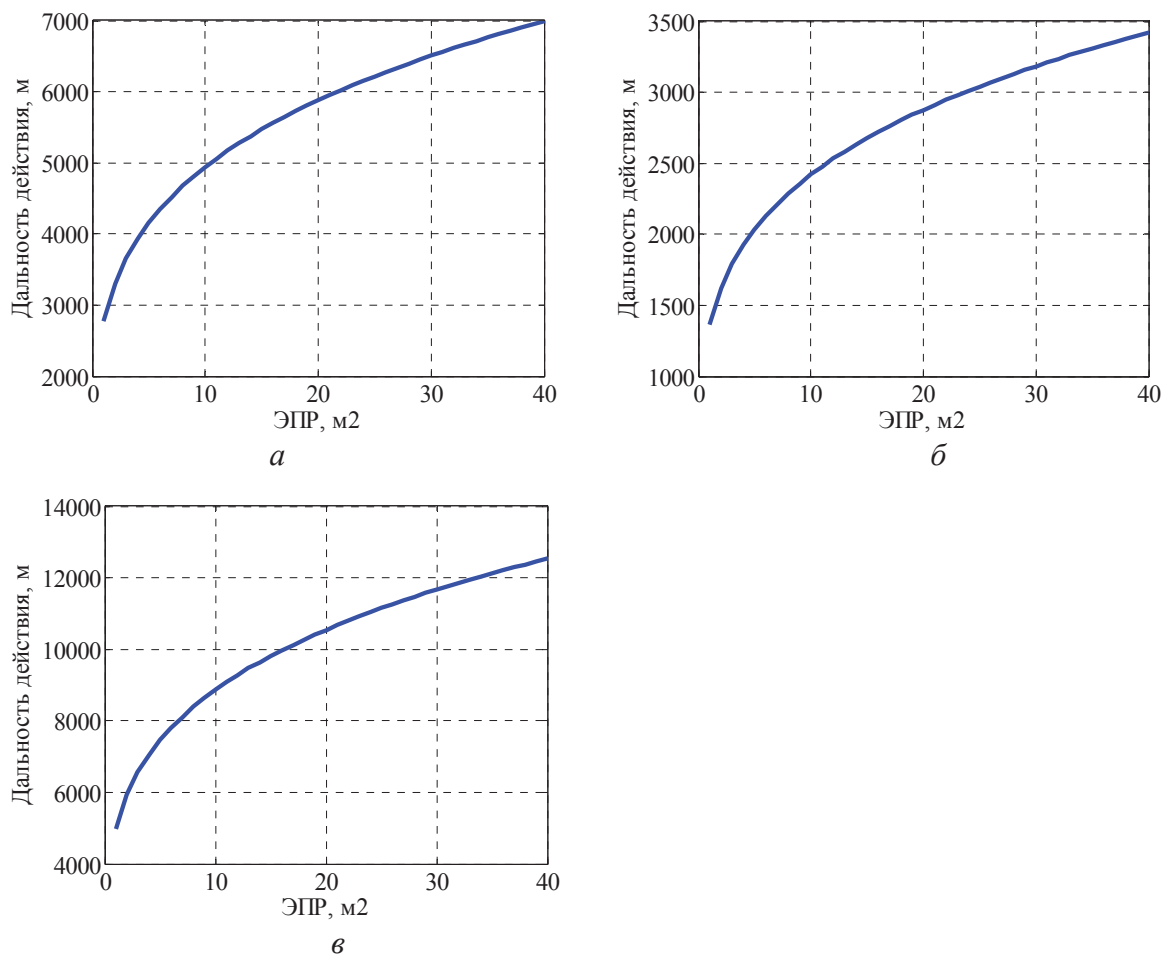


Рис. 5. Зависимость дальности действия системы от ЭПР цели при работе по сигналу: а) WiMAX; б) LTE; в) DVB-T2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEEE 802.16e/D5-2004, Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems – Amendment for Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands. URL: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16p-2012.pdf> (дата обращения: 14.08.2013).
2. ETSI EN 302 755 v1.3.1 (2012-04) Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). URL: http://telco-group.ru/files/materials-pdf/DVB_standards/DVB-T/a122_DVB-T2_spec.pdf (дата обращения: 13.08.2013).
3. ETSI TS 136 211 V9.0.0 (2010-01). URL: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136211/09.00.00_60/ts_136211v090000p.pdf (дата обращения: 10.07.2013).
4. WiMAX Forum «Mobile System Profile Specification», Release 1-IMT-2000 Edition, August 2009. URL: http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/?les/technical_document/2009/07/WMF-T23-007-R010v02_MSP-IMT-2000.pdf (дата обращения: 10.07.2013).
5. Заседание ГКРЧ от 16 марта 2012 г. URL: http://minsvy-az.ru/common/upload/Protokol_12-14_Internet_isp.pdf, (дата обращения: 19.07.2013).
6. Национальный стандарт Российской Федерации. Телевидение вещательное цифровое. URL: http://okbalfa.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=94:dvb-t-050&catid=37:dvb-t&Itemid=71 (дата обращения: 21.07.2013).
7. Казаринов Ю.М. Радиотехнические системы. – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.
8. Денисов В.П., Дудко Б.П. Радиотехнические системы. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2006. – 253 с.
9. Knott E.F., Shaeffer J.F., Tuley M.T. Radar Cross Sections. – Raleigh NC: SciTech Publishing, 2004. – 637 p.

Поступила 09.09.2013 г.

APPLICATION OF SIGNALS OF MODERN TELECOMMUNICATION SYSTEMS IN PASSIVE RADAR SYSTEMS

E.V. Rogozhnikov, D.N. Usharova, A.V. Ubauchin

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

The paper considers the features of using signals of modern telecommunication systems in passive radars. The signals of modern systems of the 4th generation, WiMAX, LTE as well as digital TV signals by DVB-T2 standard may be used as sounding ones. The authors have studied the frame structure of the systems listed; the main signal parameters, such as a band, pulse duration, output power of a transmitting set, system operation frequency range were introduced. The paper presents the main factors affecting the system power budget as well as the values of radar cross section of targets which can be detected. The authors obtained the dependences of the system power budget on the target radar cross section at operation by the signals of WiMAX, LTE and DVB-T2. The highs and lows of the listed systems signals when using them in passive radars were described.

Key words:

Telecommunication system, passive radar system, power budget, frame structure, synchronization signal, radar cross section, range resolution.

REFERENCES

1. *IEEE 802.16e/D5-2004, Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems – Amendment for Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands*. Available at: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16p-2012.pdf> (accessed 14 August 2013).
2. *ETSI EN 302 755 v1.3.1 (2012-04) Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*. Available at: http://telcogroup.ru/files/materials-pdf/DVB_standards/DVB-T/a122_DVB-T2_spec.pdf (accessed 13 August 2013).
3. *ETSI TS 136 211 V9.0.0 (2010-01)*. Available at: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136211/09.00.00_60/ts_136211v090000p.pdf (accessed 10 July 2013).
4. *WiMAX Forum Mobile System Profile Specification, Release 1-IMT-2000 Edition, August 2009*. Available at: http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/technical_document/2009/07/WMF-T23-007-R010v02_MSP-IMT-2000.pdf (accessed 10 July 2013).
5. *Zasedanie GKRCCh ot 16 marta 2012* (GKRCCh meeting of March 16, 2012). Available at: http://minsvyaz.ru/common/upload/Protokol_12-14_Internet_isp.pdf, (accessed 19 July 2013).
6. *Nacionalnyy standart Rossiyskoy federatsii. Televidenie veshchatelnoe tsifrovoe* [National Standard of the Russian Federation. Digital TV broadcasting]. Available at: http://okbalfa.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=94:dvb-t-050&catid=37:dvb-t&Itemid=71 (accessed 21 July 2013).
7. Kazarinov Yu.M. *Radiotekhnicheskie sistemy* [Radio engineering systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 496 p.
8. Denisov V.P., Dudko B.P. *Radiotekhnicheskie sistemy* [Radio engineering systems]. Tomsk, Tomsk state university of control systems and radioelectronics Publ., 2006. 253 p.
9. Knott E.F., Shaeffer J.F., Tuley M.T. *Radar Cross Sections*. Raleigh NC, SciTech Publ., 2004. 637 p.