

Koshkidko Vladimir Georgievich – Southern Federal University; e-mail: kvg59@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371733; the department of antennas and radio transmitters; cand. of eng. sc.; associate professor.

Alpatova Olga Vital'evna – e-mail: alpatova-ov@yandex.ru; phone: +78634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Serduk Edward Sergeevich – e-mail: ed.serdyuk@mail.ru; phone: +78634371733; the department of antennas and transmitting devices; postgraduate student.

УДК 621.396.969.11

В.Т. Лобач, М.В. Потипак

ИЗМЕРЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ МЕДЛЕННО ДВИЖУЩЕЙСЯ ЦЕЛИ РАДИОЛОКАТОРОМ С ВЫСОКОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ ПО ДАЛЬНОСТИ

Решается задача определения дальности медленно движущихся целей радиолокатором с высокой разрешающей способностью по дальности. Подобная задача возникает при прецизионных измерениях высоты полета носителя, например, при движении летательных аппаратов в режиме огибания рельефа местности. Высокая разрешающая способность по дальности особенно актуальна при совершении полетов в гористой местности. Существующие методы получения высокой разрешающей способности по дальности имеют ряд недостатков, ограничивающие их применение. Например, использование непрерывного излучения требует наличия высокой развязки приемной и передающей антенн. Применение импульсных сигналов, имеющих широкую полосу частот, предъявляет повышенные требования к импульсной мощности передатчика. Исследуется модель квазинепрерывного сигнала со ступенчатым изменением частоты зондирующего сигнала, позволяющая обеспечить развязку приемной и передающей антенн, при сохранении высокой пространственной разрешающей способности по дальности. Оценка дальности цели выполняется на основе анализа фазо-частотной характеристики отраженного сигнала. Показана возможность измерения дальности в условия воздействия высокого уровня помех.

РЛС; высокая разрешающая способность по дальности; радар со ступенчатым изменением частоты.

V.T. Lobach, M.V. Potipak

SLOWLY MOVING TARGET RANGE MEASUREMENT BY HIGH RANGE RESOLUTION RADAR

In this paper the method of slowly moving targets range determination by high resolution range radar is observed. This kind of task arose at precision measurements of flight vehicle altitude, for example, when aerial vehicles is in a low-level terrain following mode of flight. High range resolution is especially actual at over hilly terrain flights. Existing methods for obtaining high range resolution have several drawbacks limiting their use. For example, continuous radiation mode requires high transmitting and receiving antennas decoupling. The usage of pulsed signals with wide bandwidth, needs high transmitter pulsed power. A model of quasi-continuous signal with a stepped carrier frequency change is investigated. Such kind of signal model allows the receiving and transmitting antennas decoupling, while maintaining high spatial range resolution. Estimation target range is performed based on reflected signal phase-frequency characteristics analysis. It is shown the ability of target range measurement under high level of noise.

Radar; high range resolution; step frequency radar.

Введение. Высотомеры, построенные на базе радиолокационных систем, обладают низкой зависимостью от метеорологических условий. Однако в сравнении с лазерными системами РЛС уступали в разрешающей способности по дальности. Тем не менее в последние годы усилился интерес к радиолокационным системам, имеющим высокие точностные характеристики, что подтверждается высокой публикационной активностью по этой тематике.

Известно, что разрешающая способность по дальности радиолокационного сигнала обратно пропорциональна ширине его спектра. Рассмотрим существующие способы достижения высокой разрешающей способности по дальности.

Наиболее очевидный способ – уменьшение длительности излучаемого сигнала. Длительность сигнала в этом случае обычно варьируется в пределах 1–10 нс. Существенный недостаток таких систем в том, что широкодоступными являются только маломощные генераторы коротких импульсов, а также необходимость использования сверхбыстродействующих АЦП (порядка 0,1–5 млрд выборок в секунду и разрешением не менее 8 бит). Так, в работах [1, 2] отмечается, что, используя технологию сверхкороткоимпульсной радиолокации, возможно достичь разрешающей способности по дальности порядка 1–2 м при дальности порядка 1 км (декларируемая дальность 20–30 км). Дальнейшее повышение разрешающей способности по дальности ведет к резкому снижению дальности действия [3–5]. Показано, что использование импульсного сигнала длительностью менее 1 нс обеспечивает разрешающую способность 5–10 см при максимальной дальности действия порядка 50 м.

Традиционным способом достижения высокой разрешающей способности по дальности является использование сложных импульсных сигналов с внутримпульсной фазовой модуляцией, манипуляцией [6]. Обработка отраженного сложного сигнала происходит в согласованном фильтре, в результате прохождения через который отраженный сигнал сжимается. Достижение высоких коэффициентов сжатия связано с увеличением длительности зондирующего импульса и/или увеличением полосы занимаемых частот, что приводит к увеличению «мертвой» зоны РЛС и/или к усложнению антенной системы и приемного тракта [6, 7].

Другой способ получения высокого разрешения по дальности – использование РЛС непрерывного излучения с частотной модуляцией. Высокая разрешающая способность достигается за счет большой девиации частоты модуляции. Как правило, используется линейный закон нарастания/спадания частоты модуляции с длительностью развертки 1–100 мс. В подобных РЛС отраженный и опорный сигналы подаются на балансный модулятор, на выходе которого образуется сигнал разностной частоты. К преимуществам такого способа можно отнести низкую мощность излучения и возможность использования низкоскоростных АЦП. Однако существенным недостатком таких РЛС является необходимость обеспечения высокой развязки приемной и передающей антенн, что труднореализуемо при высоких мощностях излучения. Так, в работе [8] представлена система, обеспечивающая разрешающую способность по дальности порядка 0,5 м при дальности действия около 10 м.

Еще одним способом достижения высокой пространственной разрешающей способности является использование пачки радиоимпульсов со ступенчатым изменением частоты заполнения. Закон изменения частоты от импульса к импульсу выбирают, как правило, линейным. Впервые такой метод был предложен в 1984 г. [9] и с тех пор активно используется. Несколько реализаций указанного способа описаны в работах [9–13]. В работах [9, 11, 12] отмечается, что сигнал со ступенчатым изменением частоты чувствителен к доплеровскому сдвигу частоты. За счет движения цели возникает так называемый «циклический сдвиг» и искажение дальностного профиля. Проведенный в [10] анализ функции неопределенности

сигнала с линейным законом изменения частоты от импульса к импульсу показывает наличие неоднозначности в определении дальности и скорости движения цели. Для борьбы с такой неоднозначностью предлагается использовать несколько пачек с обратными законами изменения частоты от импульса к импульсу [10]. Рассмотрены следующие подходы для устранения неоднозначности путем компенсации скорости движения цели: многоэтапный алгоритм на основе вычисления энтропии [11], оценивание по методу максимального правдоподобия [9], с помощью нелинейного метода наименьших квадратов [12], используя пространственное сверхразрешение [13]. Однако приведенные подходы дают хорошие результаты при скоростях движения цели более 100 м/с. В ряде приложений представляет интерес оценка скоростей цели менее 10 м/с, которую не удастся выполнить ни одним из вышеперечисленных методов. В работе [14] представлен способ определения малых скоростей прецессии цели на основе измерения фазы.

Наряду с линейным законом изменения частоты от импульса к импульсу предлагается использовать частотную манипуляцию методом Костаса [10] либо случайную перестройку частоты [15, 16]. Такой закон изменения частоты приводит к формированию «кнопочной» функции неопределенности и устранению неопределенности в определении истинной дальности цели.

Общим недостатком формирования профиля высокого пространственного разрешения с помощью сигнала со ступенчатым изменением частоты является большое время анализа, что вследствие высокой разрешающей способности приводит к размыванию отклика цели за счет ее миграции по элементам разрешения. В настоящей работе предложена модель сигнала, позволяющая уменьшить время анализа, а также рассмотрен метод оценки скорости цели на основе анализа частотной зависимости фазы.

Модель сигнала. РЛС излучает пачку из N радиоимпульсов (рис. 1,а) с длительностью каждого импульса τ . В интервал однозначного измерения дальности T_r помещается M импульсов, причем $M = \lfloor T_r / \tau \rfloor$. Общее время анализа равно $N\tau$, что в M раз меньше традиционного подхода. Частота заполнения каждого импульса f_i выбирается согласно закону кодирования частоты

$$f_0 + n\Delta f + m\Delta F = f_{m+n\cdot M}, \quad (1)$$

где f_0 – несущая частота сигнала; $\Delta f = B/N$ – малый шаг изменения девиации; $B = c/(2\Delta R)$ – синтезируемая ширина спектра сигнала; ΔR – разрешающая способность по дальности; $\Delta F = M\Delta f$ – большой шаг изменения девиации.

Закон изменения частоты, определяемый выражением (1), приведен на рис. 2.

Математическая модель зондирующего сигнала $\dot{U}(t)$ может быть представлена в виде

$$\dot{U}(t) = e^{j2\pi(f_0 + n\Delta f + m\Delta F)[t - \tau(m + M \cdot n)]}, \quad m \in [0, M - 1], n \in [0, N/M - 1]. \quad (2)$$

Предположим, что зондирующий сигнал отражается от одиночной точечной цели, расположенной на дальности R_0 и имеющей радиальную скорость V_r . Тогда отраженный сигнал $\dot{U}_{rx}(t)$ будет определяться выражением

$$\dot{U}_{rx}(t) = A_{rx} e^{j2\pi(f_0 + n\Delta f + m\Delta F) \left[t - \tau(m + M \cdot n) - \frac{2R_0 + 2V_r \tau(m + M \cdot n)}{c} \right]} + w(t), \quad (3)$$

где A_{rx} – амплитуда принятого сигнала; $w(t)$ – шумовая помеха.

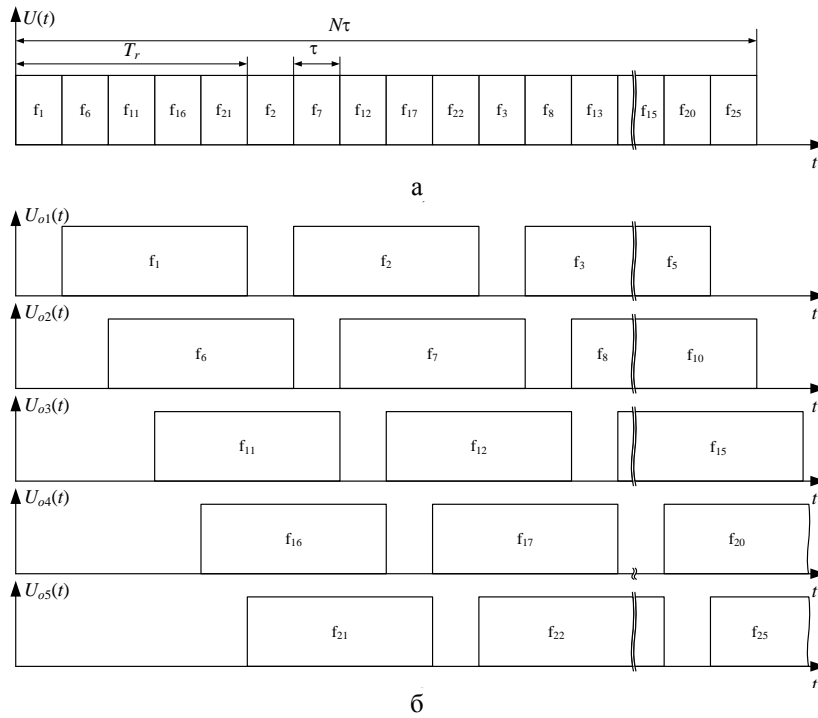


Рис. 1. Квазинепрерывный сигнал со ступенчатым изменением частоты (а) и опорные сигналы (б)

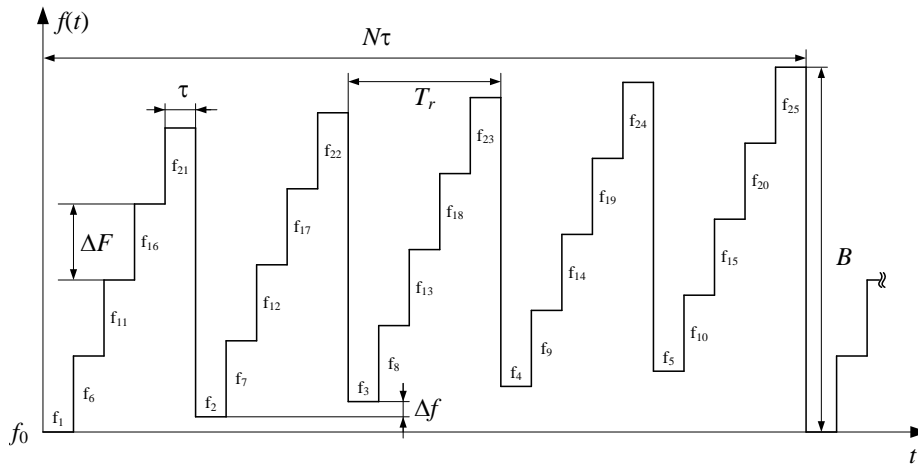


Рис. 2. Закон изменения частоты

Схема обработки отраженного сигнала представлена на рис. 1,б, в соответствии с которой опорный сигнал $\dot{U}_o(t)$ может быть представлен выражением

$$\dot{U}_o(t) = e^{j2\pi(f_0 + n_o \Delta f + m_o \Delta F)[t - \tau(m_o + M \cdot n_o)]}, \quad m_o \in [0, M - 1], \quad n_o \in [0, N/M - 1]. \quad (4)$$

Сигнал на выходе приемника $\dot{U}_r(t)$ можно записать в виде

$$\dot{U}_r(t) = \dot{U}_{rx}(t) \cdot \dot{U}_o^*(t), \quad (5)$$

где $\dot{U}_o^*(t)$ – опорный сигнал, комплексно сопряженный с $\dot{U}_o(t)$.

Подставляя в (5) выражения (3), (4) и проводя усреднение на интервале T_r (см. рис. 1,б), получим

$$\bar{\dot{U}}_r = A_r e^{-j2\pi(f_0 + n\Delta f + m\Delta F) \frac{2R_0 + 2V_r \tau(m + M \cdot n)}{c}} + \bar{W}. \quad (6)$$

Выражение (6) получено при условии, что $m_o = m, n_o = n$. В случае, когда $m_o \neq m, n_o \neq n$, в сигнале присутствуют высокочастотные составляющие, которые в среднем компенсируются.

Далее выполняется упорядочивание частот f_i по возрастанию, производится коррекция фазовых набегов и вычисляется обратное преобразование Фурье.

Моделирование. В соответствии с методикой, описанной выше было, проведено моделирование дальностного профиля высокого разрешения. Результат представлен на рис. 3. Моделирование проводилось для следующих параметров: однозначно измеряемая дальность – 9000 м; $\Delta R = 0,75$ м; время анализа – 24 мс; $N = 12\,000$; $\tau = 2$ мкс; $M = 32$; $\Delta f = 16\,667$ Гц; $\Delta F = 6,250$ МГц. Одиночная неподвижная цель с ЭПР $0,5 \text{ м}^2$ находится на дальности 5013 м. Цель с радиальной скоростью 3 м/с и ЭПР $0,5 \text{ м}^2$ находится на дальности 5133 м (истинная дальность 5013 м).

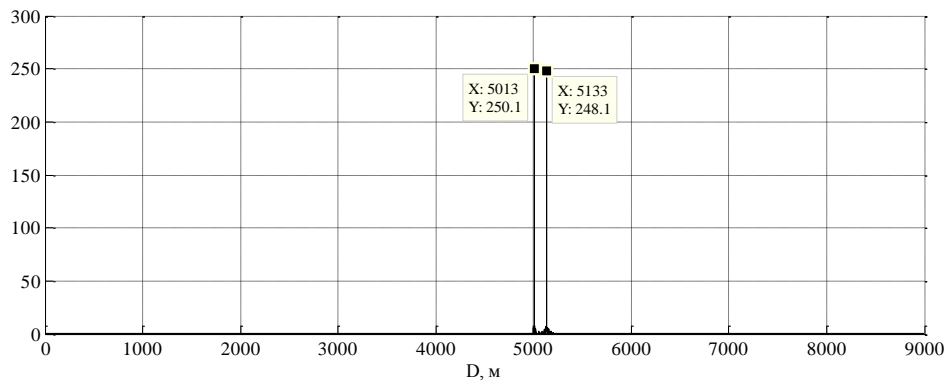


Рис. 3. Дальностный профиль высокого разрешения в отсутствии помехи

Из рис. 3 видно, что даже небольшая радиальная скорость цели приводит к значительной неоднозначности (20 м) в определении истинной дальности.

Анализ выражения (6) показывает, что информация о дальности и скорости цели содержится в фазе синтезируемого дальностного профиля. Как было отмечено в работе [14], при необходимости выделения дополнительной информации о цели необходимо переходить к анализу ее фазовой характеристики. На рис. 4 приведена фазовая характеристика одиночной цели в условии отсутствия помехи, а на рис. 5 представлен дальностный профиль в условиях воздействия помехи. Для получения фазы отдельной цели, необходимо проводить ее стробирование по дальности, после чего выполнять прямое дискретное преобразование Фурье.

На рис. 6 показан случай, когда стробирование по дальности не проведено. Видно, что фазовая характеристика цели полностью разрушена действующей помехой.

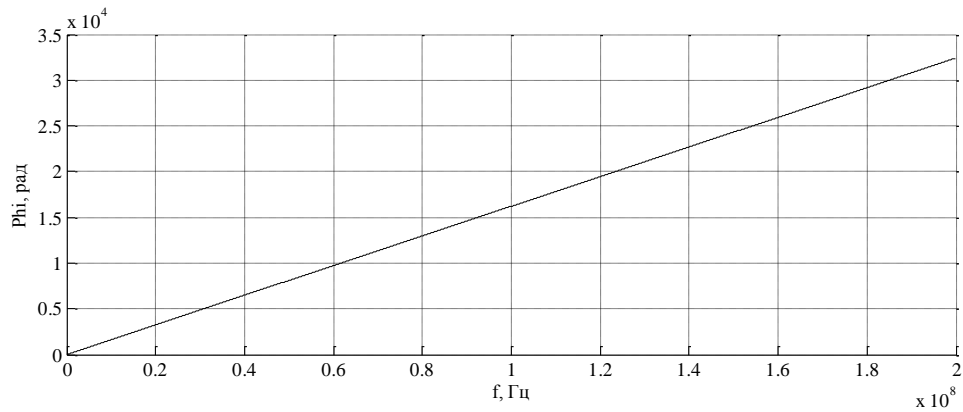


Рис. 4. Фазовая характеристика одиночной цели в отсутствии помехи

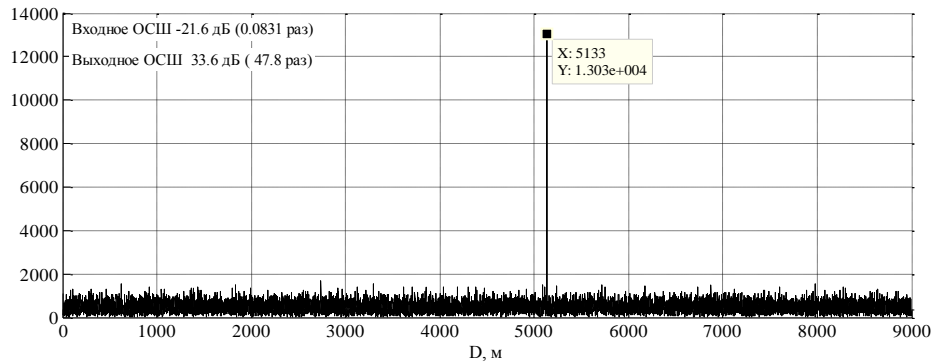


Рис. 5. Дальностный профиль высокого разрешения в условиях воздействия помехи

На рис. 7 приведен дальностный профиль со стробом по дальности. Стробирование выполнялось 512 точечным окном Блекмана. На рис. 8 представлена восстановленная фазовая характеристика цели. Результаты моделирования показывают возможность уверенного восстановления фазовой характеристики одиночной цели в условиях воздействия помех для последующей компенсации ее скорости.

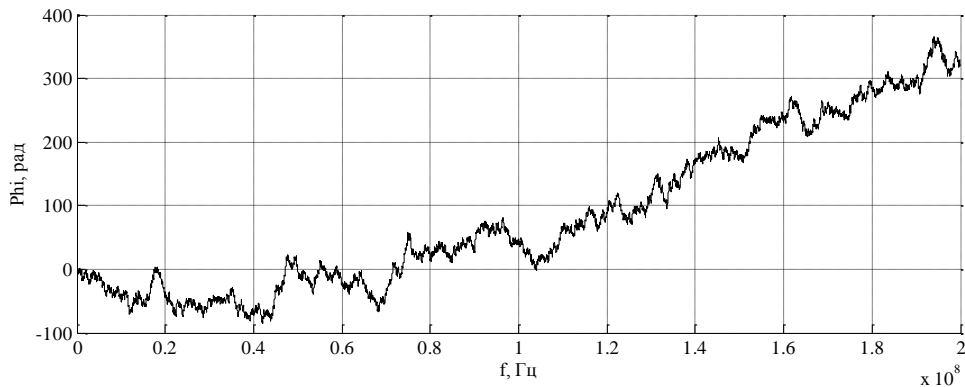


Рис. 6. Фазовая характеристика одиночной цели в условиях воздействия помехи

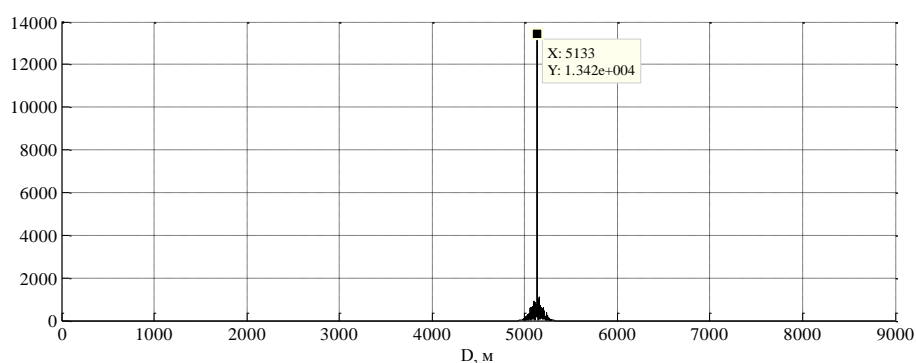


Рис. 7. Дальностной профиль высокого разрешения в условиях воздействия помехи со стробом по дальности

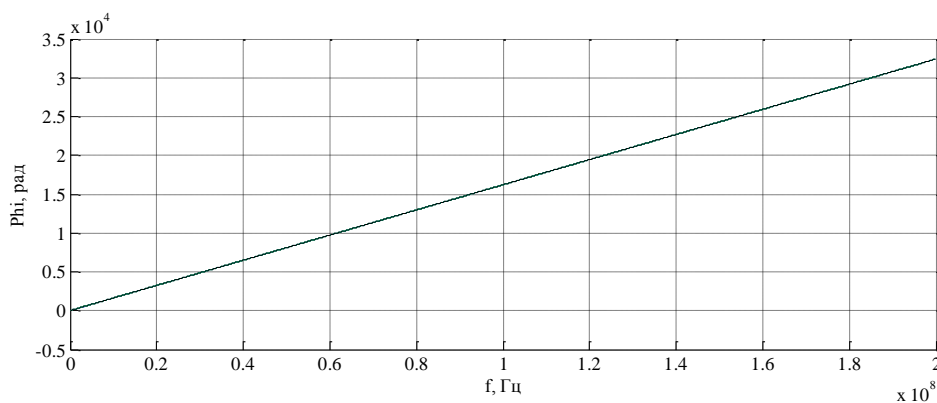


Рис. 8. Фазовая характеристика одиночной цели в условиях воздействия помехи со стробом по дальности

Необходимо отметить, что основной недостаток предложенного в работе [14] метода заключается в необходимости первичного разделения групповой цели для выделения индивидуальных фазовых характеристик.

Заключение. Проведен обзор современных методов получения высокой разрешающей способности по дальности. Показаны преимущества применения сигналов со ступенчатым изменением частоты. Предложена новая модель сигнала, позволяющая существенно сократить время анализа без ухудшения разрешающей способности по дальности. Рассмотрена возможность извлечения фазовой характеристики одиночной цели для проведения последующей компенсации искажения дальностного профиля, вызванного движением цели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Скосырев В.Н.* Повышение информативности радиолокационных систем на основе технологий сверхширокополосных сигналов // Журнал радиоэлектроники. – 2012. – № 7. – С. 8.
2. *Доржиев Б.Ч., Очиров О.Н., Базаров А.В., Дарижанов Д.Д.* Экспериментальные результаты короткоимпульсной локации лесных сред // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – № 10. – С. 486-500.
3. *Advances in Vehicular Networking Technologies / Edited by M. Almeida // In Tech.* – 2011.

4. Klotz M., Rohling H. 24 GHz radar sensors for automotive applications // *Microwaves, Radar and Wireless Communications*. 2000. MIKON-2000. 13th International Conference on IEEE. – 2000. – Т. 1. – С. 359-362.
5. Smith G.E., Ahmad F., Amin M.G. Micro-Doppler processing for ultra-wideband radar data // *SPIE Defense, Security, and Sensing*. – International Society for Optics and Photonics, 2012. – С. 83610L-83610L-10.
6. Справочник по радиолокации / Под ред. М.И. Скольника: Пер. с англ. / Под общей ред. д.т.н., проф. В.С. Вербы. – М.: Техносфера, 2014. – 1352 с.
7. Levanon N., Mozeson E. Radar signals. – John Wiley & Sons, 2004.
8. Ali F., Vossiek M. Detection of weak moving targets based on 2-D range-Doppler FMCW radar Fourier processing // *German Microwave Conference*, 2010. – IEEE, 2010. – С. 214-217.
9. Liu Y. et al. Motion compensation of moving targets for high range resolution stepped-frequency radar // *Sensors*. – 2008. – Vol. 8, №. 5. – С. 3429-3437.
10. Levanon N. Stepped-frequency pulse-train radar signal // *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*. – 2002. – Т. 149, №. 6. – С. 297-309.
11. Lin Y. et al. The New Mathematical Model of Motion Compensation for Stepped-Frequency Radar Signal // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2014. – Vol. 2014. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/142482> (дата обращения 15.10.2014).
12. Liu Y. et al. Velocity estimation and range shift compensation for high range resolution profiling in stepped-frequency radar // *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*. – 2010. – Vol. 7, №. 4. – С. 791-795.
13. Sarkas I. Step Frequency Radar Using Compressed Sensing // Department of Mathematics of the University of Toronto, Tech. Rep. – 2010. URL: http://wiki.math.toronto.edu/TorontoMathWiki/images/b/bd/2010_JEB1433_Sarkas_SFR_CS_Report.pdf (дата обращения 15.10.2014)
14. Liu Y. et al. Micromotion Characteristic Acquisition Based on Wideband Radar Phase // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 52. – С. 3650-3657.
15. Axelsson S. R. J. Analysis of random step frequency radar and comparison with experiments // *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*. – 2007. – Vol. 45, №. 4. – С. 890-904.
16. Huang T. et al. Randomized step frequency radar with adaptive compressed sensing // *Radar Conference (RADAR), 2011 IEEE*. – 2011. – С. 411-414.

REFERENCES

1. Skosyrev V.N. Povyshenie informativnosti radiolokatsionnykh sistem na osnove tekhnologii sverkhshirokopolosnykh signalov [Raising awareness radar systems based on technologies sverkhshirokopolosnykh signals], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio electronics], 2012, No. 7, pp. 8.
2. Dorzhiev B.Ch., Ochirov O.N., Bazarov A.V., Darizhapov D.D. Eksperimental'nye rezultaty korotkoimpul'snoy lokatsii lesnykh sred [Experimental results of the short-pulse locations of forest environments], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio electronics], 2010, No. 10, pp. 486-500.
3. Advances in Vehicular Networking Technologies, Edited by M. Almeida, *In Tech.*, 2011.
4. Klotz M., Rohling H. 24 GHz radar sensors for automotive applications, *Microwaves, Radar and Wireless Communications*. 2000. MIKON-2000. 13th International Conference on IEEE, 2000, Vol. 1, pp. 359-362.
5. Smith G. E., Ahmad F., Amin M. G. Micro-Doppler processing for ultra-wideband radar data, *SPIE Defense, Security, and Sensing*. – International Society for Optics and Photonics, 2012, pp. 83610L-83610L-10.
6. Справочник по радиолокации [The reference radar], Под ред. М.И. Скольника: Пер. с англ. Под обшчey ред. д.т.н., проф. В.С. Вербы. Moscow: Tekhnosfera, 2014, 1352 p.
7. Levanon N., Mozeson E. Radar signals. John Wiley & Sons, 2004.
8. Ali F., Vossiek M. Detection of weak moving targets based on 2-D range-Doppler FMCW radar Fourier processing, *German Microwave Conference, 2010*. IEEE, 2010, pp. 214-217.
9. Liu Y. et al. Motion compensation of moving targets for high range resolution stepped-frequency radar, *Sensors*, 2008, Vol. 8, No. 5, pp. 3429-3437.
10. Levanon N. Stepped-frequency pulse-train radar signal, *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2002, Vol. 149, No. 6, pp. 297-309.

11. Lin Y. et al. The New Mathematical Model of Motion Compensation for Stepped-Frequency Radar Signal, *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, Vol. 2014. Available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/142482> (дата обращения Accessed 15 October 2014).
12. Liu Y. et al. Velocity estimation and range shift compensation for high range resolution profiling in stepped-frequency radar, *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2010, Vol. 7, No. 4, pp. 791-795.
13. Sarkas I. Step Frequency Radar Using Compressed Sensing, *Department of Mathematics of the University of Toronto, Tech. Rep.* 2010. Available at: http://wiki.math.toronto.edu/TorontoMathWiki/images/b/bd/2010_JEB1433_Sarkas_SFR_CS_Report.pdf (Accessed 15 October 2014).
14. Liu Y. et al. Micromotion Characteristic Acquisition Based on Wideband Radar Phase, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, Vol. 52, pp. 3650-3657.
15. Axelsson S. R. J. Analysis of random step frequency radar and comparison with experiments, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2007, Vol. 45, No. 4, pp. 890-904.
16. Huang T. et al. Randomized step frequency radar with adaptive compressed sensing, *Radar Conference (RADAR), 2011 IEEE*, 2011, pp. 411-414.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

Лобач Владимир Тихонович – Южный федеральный университет; e-mail: rts@tgn.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371637; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; зав. кафедрой; к.т.н.

Потипак Михаил Владимирович – e-mail: potipak@sfedu.ru; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; к.т.н.; доцент.

Lobach Vladimir Tikhonovich – Southern Federal University; e-mail: rts@tgn.sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371637; the department of radio engineering and telecommunication systems; head the department; cand. of eng. sc.

Potipak Michael Vladimirovich – e-mail: potipak@sfedu.ru; the department of radio engineering and telecommunication systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК. 621.396.677.3

Ю.В. Юханов, Т.Ю. Привалова, И.В. Мерглолов

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАССЕЙНИЯ МНОГОМОДОВОЙ ВОЛНОВОДНОЙ РЕШЕТКИ VAN-АТТА*

Рассматриваются условия максимального расширения углового сектора работы решетки Ван-Атта. Получены приближенные формулы для бистатической и моностатической диаграмм рассеяния таких волноводных решеток с учетом возбуждения и распространения в трактах соединяющих излучатели, как основного, так и высших типов волн. Проанализирован их вклад в рассеянное поле. Дана оценка требуемого числа высших типов волн и условия их распространения для обеспечения максимально широкой моностатической диаграммы. На основе проведенного анализа предложены конструкции многомодовых волноводных решеток Ван-Атта с трактами, обеспечивающими недисперсионную передачу полей между каждой парой излучателей. Показана возможность реализации многомодового режима в трехмерных моделях антенной решетки. Проведен анализ характеристик рассеяния двумерных и трехмерных моделей антенн. Реализована двухэлементная решетка Ван-Атта на основе трехмодовых волноводов, соединенных тремя коаксиальными линиями, с рабочим сектором углов $\pm 45^\circ$ по уровню -3дБ.

Решетка Ван-Атта; одномодовая решетка; многомодовая решетка; моностатическая диаграмма рассеяния; бистатическая диаграмма отражение.

* Результаты, изложенные в статье, получены в рамках выполнения гранта № 8.2461.2014/К.