

**В. Г. Сугак***Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины  
12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: sugak@ire.kharkov.ua*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНТРОПИИ ФАЗОВОЙ СТРУКТУРЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ЗА ЛИСТВОЙ КУСТАРНИКОВ И ДЕРЕВЬЕВ

В статье приведены результаты исследования возможности обнаружения слабого движения целей (людей и объектов) за листвой кустарников и деревьев при использовании радиолокатора со ступенчатым изменением несущей частоты в диапазоне частот 1 200...1 800 МГц. В качестве основного метода обработки сигналов предложено использовать взвешенные энтропией флуктуации фазы отраженного сигнала в каналах дальности. Показано, что использование такого взвешивания позволяет существенно увеличить наблюдаемость и обнаруживаемость слабо подвижных объектов за листвой кустарников и деревьев. Ил. 7. Библиогр.: 15 назв.

**Ключевые слова:** радиолокационная система, обнаружение объектов за листвой, фазочастотный спектр, энтропия.

На вооружении армий многих стран мира состоят так называемые радиолокационные станции (РЛС) наземной разведки, предназначенные для обнаружения личного состава и боевой техники, в том числе маскируемых листвой деревьев и кустарников.

В большинстве таких РЛС используется доплеровский режим работы в диапазоне частот зондирующего сигнала от нескольких сотен мегагерц до единиц гигагерц. Вследствие низких значений доплеровского сдвига несущей частоты отраженного сигнала указанные РЛС не позволяют выявлять слабо подвижные цели при использовании классических методов доплеровской селекции движущихся целей.

К общим недостаткам большинства РЛС наземной разведки можно отнести также трудность распознавания выявленных целей, чувствительность к осадкам и помехам, вызываемых раскачиванием ветвей деревьев, кустарников и травы.

Устойчивое обнаружение движущихся объектов в присутствии помеховых отражений от листвы, веток и стволов деревьев, кустарника и пр. представляет собой значительную проблему даже в указанном диапазоне частот, где затухание радиоволн существенно меньше по сравнению с более высокочастотными диапазонами. Деревья и кустарники обладают многочисленными дискретными рассеивателями, такими как случайно распределенные листья, ветки и стволы. Распространение радиоволн в таких средах сопровождается многолучевым рассеянием, отражением, рефракцией, дифракцией и поглощением излучения. Эти механизмы в сочетании приводят к интенсивным многолучевым эффектам, помехам и пропадающим принимаемым сигналам [1–3].

При традиционном подходе к задаче обнаружения целей сигнал, отраженный от рас-

сматриваемого элемента разрешения радиолокатора, сравнивается с некоторым пороговым значением, по которому делается вывод о присутствии цели. Все элементы разрешения наблюдаемого пространства рассматриваются последовательно во времени при сканировании лучом диаграммы направленности выбранного сектора наблюдения. Учет информации в смежных к рассматриваемым элементам разрешения ячейках мог бы существенно улучшить характеристики обнаружения радиолокационной системы.

Таким образом, для улучшения характеристик обнаружения небольших движущихся объектов в средах при низком соотношении сигнал/помеха можно использовать метод одновременного обнаружения и слежения, так называемый метод слежения перед обнаружением (*Track Before Detect method*) [4]. В основе такого метода лежит преобразование Хауфа (*HT*) [4], которое базируется на обнаружении траекторий в виде линий на радиолокационном изображении заданного пространства, искаженном помехами. Некоторые из применений этого преобразования описаны в [6–8]. В этом методе при обнаружении небольших целей наиболее полно используется информация, которая содержится в соседних ячейках пространственных элементов разрешения. Благодаря лучшему использованию пространственно распределенной энергии улучшается обнаруживаемость цели. В работах [9–11] делается вывод о том, что *HT* может применяться для обнаружения и слежения за целями при низком соотношении сигнал/помеха в окружении сильных помех.

Зондирование в среде, которой является местность, покрытая кустарником и деревьями, в некотором смысле совпадает с зондированием в подповерхностном пространстве, так как в обоих

случаях имеется некоторая частотная дисперсия затухания и фазовой скорости распространения радиоволн. Поэтому фазовая структура отраженных сигналов может иметь подобные случаю подповерхностного зондирования свойства, описанные, например, в [12], т. е. она должна быть чувствительна к изменению физических свойств элемента пространственного разрешения, например, в результате появления в нем человека. Используя этот принцип, можно улучшить характеристики обнаружения в элементе разрешения людей, металлических объектов (вооружения) и т. п.

**1. Краткое описание прототипа радиолокатора, методики тестирования и результатов зондирования.** Для проверки идеи и потенциальных возможностей метода был использован прототип РЛС с зондирующим сигналом со ступенчатым изменением несущей частоты в диапазоне 1 200...1 800 МГц. В ходе эксперимента использовалась только часть этого диапазона, 1 200...1 400 МГц, что соответствовало разрешающей способности по дальности  $\approx 0,8$  м. Выходная мощность передатчика была  $\approx 1$  Вт. В состав системы входили также синтезатор частот, широкополосный демодулятор, умножители частоты, микропроцессорный блок, два аналого-цифровых преобразователя для каждого из квадратурных сигналов и др. Связь между радиолокатором и переносным компьютером осуществлялась с помощью радиоканала на расстоянии до 100 м.

Была выбрана вертикальная поляризация излучения и приема, что заведомо ухудшало соотношение сигнал/помеха по сравнению со случаем горизонтальной поляризации, так как согласно [4] погонное затухание в листве описывается формулой:

$$A_m = \beta f^\alpha, \quad (1)$$

где  $f$  – частота;  $\alpha$  и  $\beta$  – константы ( $\alpha = 0,79$ ,  $\beta = 0,05$  – для горизонтальной поляризации;  $\alpha = 0,5$ ,  $\beta = 0,45$  – для вертикальной поляризации излучения и приема).

Тестирование осуществлялось весной и летом 2016 г. Прототип РЛС располагался вблизи небольшой ивы (рис. 1).

Тестирование проводилось в два этапа. Вначале осуществлялось зондирование самой ивы с дистанции примерно 7 м. На следующем этапе зондировалось то же пространство при том же положении радиолокационной системы, но при сравнительно медленном перемещении человека в пространстве, непосредственно за кроной дерева. Движение человека осуществлялось к дереву в направлении, близком к перпендикуляру к оси диаграммы направленности антенн, т. е. так,

чтобы радиальная скорость была минимальной. Сравнивая результаты измерений в этих двух случаях, можно было оценить потенциальные возможности метода.



Рис. 1. Внешний вид радиолокатора и места тестирования

Расстояние 7 м было выбрано из соображений обеспечения примерно того же разрешения в горизонтальном направлении на расстоянии 500...800 м, которое будет достигнуто в реальной ситуации при использовании антенной решетки длиной  $\approx 10$  м.

На рис. 2 показано распределение мощности радиолокационных сигналов, отраженных от дерева и его кроны. По оси абсцисс отложено расстояние от раскрыва антенн, а по оси ординат – мощность сигналов. Видно, что наиболее сильно отражаются сигналы от ближней и дальней кромок дерева.

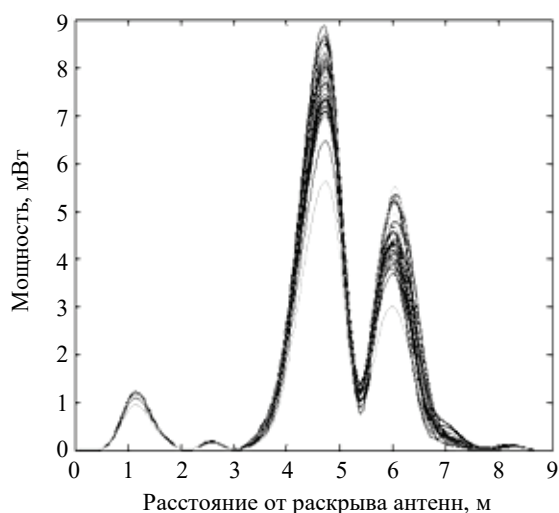


Рис. 2. Распределение мощности отраженных сигналов по дистанции

На рис. 3 представлена временная зависимость отраженных сигналов в системе координат, в которой ось абсцисс соответствует време-

ни, ось ординат – дистанции от раскрыва антенн, а степень затемнения на изображении характеризует мощность сигналов. Время, необходимое для оценки одного распределения мощности отраженного сигнала по дальности, соответствует примерно 2 с. Следующее изображение (рис. 4) показывает фазовую структуру сигналов в той же системе координат. Фактически фазовая структура представляет собой фазочастотный спектр квадратурных сигналов на выходе фазового детектора приемника при специальном его представлении, когда линиями выделяются значения фазы, равные  $n\pi$  (на изображении это кривые, соответствующие этим фазовым сдвигам) [13]. При отсутствии изменений в фазовых сдвигах  $n\pi$  по дальности эти линии являются прямыми.

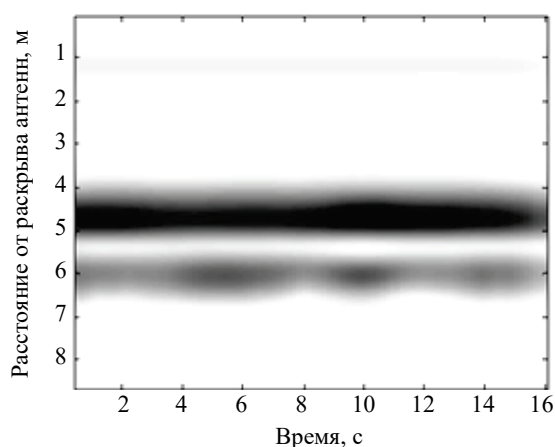


Рис. 3. Распределение мощности отраженных сигналов во времени

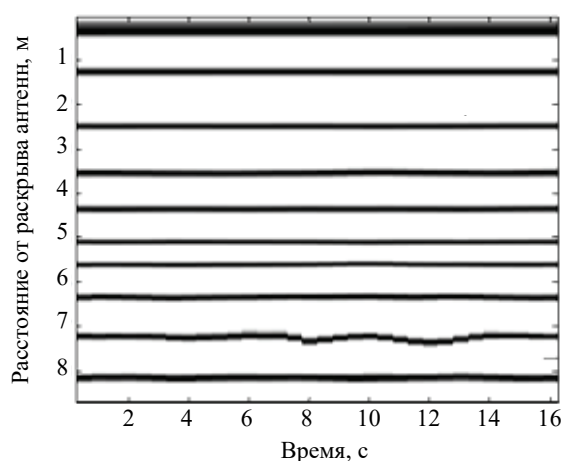


Рис. 4. Фазовая структура сигналов, отраженных от наблюдаемой сцены в отсутствие движения человека

На рис. 5 приведено аналогичное изображение фазовой структуры сигналов в той же системе координат при движении человека, медленно входящего в пространство непосредствен-

но за деревом. Изображение мощности сигналов, отраженных от наблюдаемой сцены, в этом случае практически идентично рис. 2.

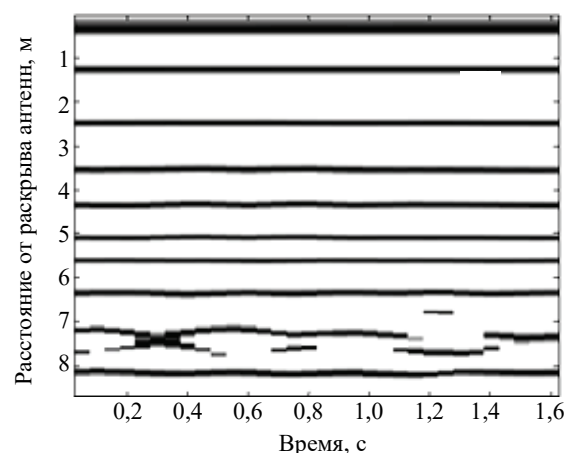


Рис. 5. Фазовая структура сигналов, отраженных от наблюдаемой сцены при наличии движения человека

Следовательно, с помощью только энергетических характеристик очень сложно идентифицировать сигналы, отраженные от движущегося человека. Однако на рисунках, соответствующих изображению фазовой структуры сигналов (рис. 4 и 5), можно четко выделить зону, соответствующую отражениям от движущегося человека. Это дает основание для разработки алгоритма обнаружения движения человека за листвой кустарников и деревьев, построенного с использованием фазовой структуры сигналов.

**2. Алгоритм выделения информации о движущемся объекте на основе использования энтропии сигналов.** Рассмотрим один из возможных алгоритмов выделения информации о движении человека за листвой.

При движении объекта за деревьями и кустарником результирующий сигнал может быть представлен совокупностью прямого сигнала и сигналов, обусловленных многолучевым распространением, за счет отражения от листвы, веток и стволов деревьев [3, 4]. Это приводит к появлению флуктуаций принимаемого сигнала, обусловленных случайной фазой суммарного сигнала при движении объекта.

Следует подчеркнуть, что подобные флуктуации сигнала возникают только в случае движения объекта за кустарником и деревьями, так как происходит непрерывное изменение длины путей распространения и количества отражающих элементов. Для упрощения рассмотрим передающий сигнал  $s(t)$ . Тогда отраженный сигнал, соответствующий рассматриваемой ячейке дальности, содержащей цель, описывается выражением:

$$r(t) = s(t - \tau_0) + \sum_{p=1}^P a_p s(t - \tau_p), \quad (2)$$

где  $\tau_0$  – время задержки сигнала между радиолокатором и целью вдоль прямого луча. Кроме того,  $a_p$  и  $\tau_p$  – амплитуда и время задержки многолучевых компонентов сигналов между радиолокатором и целью. Заметим, что в рассматриваемой среде с многочисленными отражающими компонентами и без конкретизации геометрии многолучевые эффекты являются настолько сложными, что их природа может рассматриваться как случайная. Тогда величины  $a_p$ ,  $\tau_p$  и  $P$  должны флуктуировать от элемента разрешения к элементу разрешения в пределах когерентного интервала накопления.

Следовательно, чтобы уменьшить эффекты, связанные с многолучевым распространением, и выделить траектории движения цели, можно применить взвешенное с использованием энтропии когерентное накопление информации. Энтропия – это своего рода коэффициент оценивания, который позволяет учесть уровень стационарности информации в ячейках разрешения в пределах когерентного интервала накопления. Энтропия в  $j$ -й ячейке элемента разрешения определяется в следующем виде [13, 14]:

$$E_j = - \sum_{i=1}^I P_{i,j} \log P_{i,j},$$

$$i = 1, 2, \dots, I, \quad j = 1, 2, \dots, J, \quad (3)$$

$$P_{i,j} = \frac{|x_{i,j}|}{\sum_i |x_{i,j}|},$$

где  $|x_{i,j}|$  – амплитуда сигнала в  $i$ -м временном интервале в  $j$ -м элементе разрешения по дистанции;  $I$  – количество рассматриваемых временных интервалов в пределах когерентного интервала накопления;  $J$  – количество рассматриваемых элементов разрешения по дистанции. Подчеркнем, что движущаяся цель должна оставаться в одном и том же элементе дальности в пределах когерентного интервала накопления.

Если  $E_j = \log I$ , то амплитуды сигналов в  $j$ -й ячейке дистанции являются относительно стационарными и в ней может находиться цель. Тогда информация должна накапливаться в полном объеме. Если  $E_j \rightarrow 0$ , то амплитуды сигналов, относящиеся к  $j$ -й ячейке дистанции, слабо флуктуируют и в ней могут быть только помеховые сигналы. Тогда эта информация должна быть уменьшена при накоплении. Основываясь на энтропии каждой ячейки по дальности, когерентный результат накопления в пределах когерент-

ного интервала может быть записан в следующем виде:

$$A_j = \sum_{i=1}^I \left( \frac{E_j}{\log I} \right) x_{i,j}. \quad (4)$$

Согласно (4), информация в рассматриваемых элементах разрешения по дальности взвешивается с помощью коэффициентов  $(E_j / \log I)^{i-1}$  в когерентном интервале. Тогда многолучевые эффекты в случае отсутствия движущейся цели будут эффективно подавляться, а при наличии слабого движения – подчеркиваться. Такой подход можно применить при обработке фазового набега сигналов в элементах разрешения, т. е. к фазовой структуре этих сигналов.

На рис. 6 и 7 представлены результаты такого взвешивания, примененного к флуктуациям фазы отраженного сигнала в каналах дальности в рассматриваемом элементе пространства. Фактически на этих рисунках представлены результаты взвешивания фазы в каждом элементарном временном интервале  $i$ , т. е. в соответствии с формулой:

$$\Phi_{i,j} = \left( \frac{E_j}{\log I} \right) \varphi_{i,j}, \quad (5)$$

где  $\varphi_{i,j}$  – значение фазового набега в  $j$ -м канале дальности в  $i$ -м временном интервале накопления.

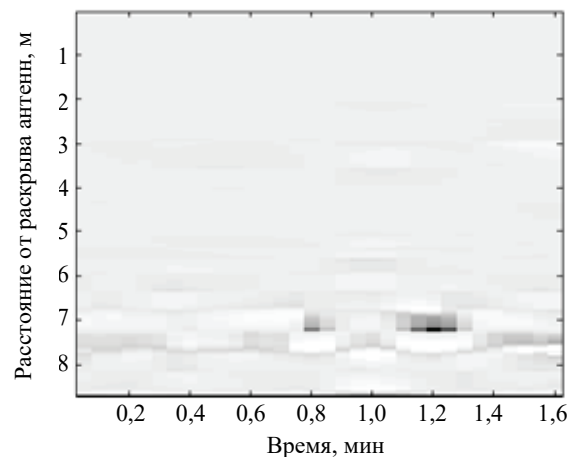


Рис. 6. Фазовая структура радиолокационных сигналов, взвешенных энтропией флуктуаций фазы при отсутствии движения за деревом

Изображение на рис. 6 соответствует случаю отсутствия движущегося объекта, а на рис. 7 – случаю наличия движущегося объекта за листвой дерева. Видно, что сигналы во всех элементах разрешения, не связанных с движущимся объектом, эффективно подавлены, а сигналы от движущегося объекта оказались подчеркнутыми.



Для разработки алгоритма автоматического обнаружения слабого движения объекта за листвой в каком-либо элементе разрешения по дальности можно накапливать информацию, соответствующую флуктуациям фазы сигналов, в каждом из всех рассматриваемых каналов дальности после применения энтропийного взвешивания.

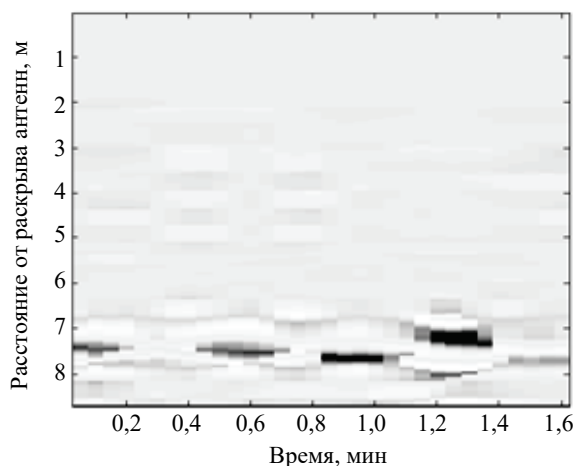


Рис. 7. Фазовая структура радиолокационных сигналов, взвешенных энтропией флуктуаций фазы при наличии движения за деревом

В результате можно получить изображение (рис. 8), где по оси абсцисс отложена дальность, а по оси ординат – значение накопленного фазового сдвига за выбранное время в соответствующем канале дальности.

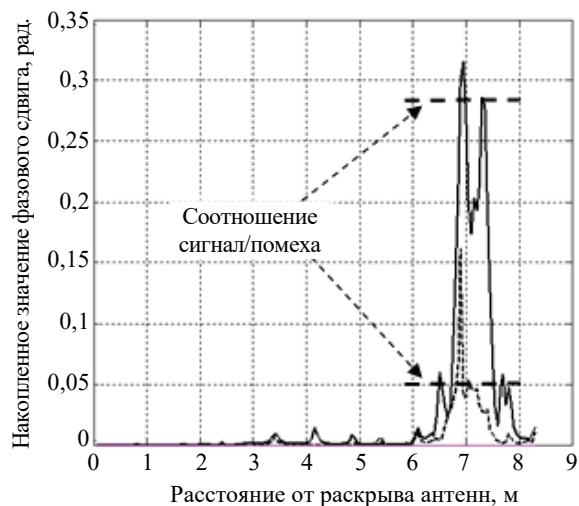


Рис. 8. Накопление энтропии в каждом элементе разрешения по времени наблюдения

Накопление фазы происходит за время наблюдения 1,6 мин, что соответствует времени, отложенному по оси абсцисс на рис. 6 и 7 в соответствии с формулой (5). Пунктирными линиями

выделены накопленные значения фазы в ячейках дальности, в которых наблюдалось движение объекта. Сплошная кривая соответствует присутствию движущегося объекта, а пунктирная кривая – его отсутствию.

**Выводы.** Результаты оценки возможности обнаружения слабо движущихся объектов за листвой кустарников и деревьев, полученные с использованием прототипа РЛС со ступенчатым изменением несущей частоты в диапазоне 1 200...1 400 МГц, дают возможность утверждать следующее:

- использование информации об изменении фазовой структуры в элементах разрешения по дальности в радиолокаторе с зондирующим сигналом со ступенчатым изменением несущей частоты позволяет существенно увеличить наблюдаемость таких объектов, как движущийся человек;
- использование взвешивания флуктуаций фазы в каналах дальности их энтропией позволяет существенно увеличить обнаруживаемость слабо подвижных целей с использованием автоматической процедуры без участия человека.

#### Библиографический список

1. Liang J., Liang Q. Outdoor propagation channel modeling in foliage environment. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2010. Vol. 59, N 5. P. 2243–2252.
2. Meng Y. S., Lee Y. H., Ng B. C. Empirical near ground path loss modeling in a forest at VHF and UHF bands. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2009. Vol. 57, N 5. P. 1461–1468.
3. Dehmollaian M., Sarabandi K. Electromagnetic scattering from foliage camouflaged complex targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2006. Vol. 44, N 10. P. 2698–709.
4. Davis M. E., Tomlinson P. G. and Malony R. P. Technical challenges in ultrawideband radar development for target detection and terrain mapping. *Proc. IEEE Radar Conf.* Boston (MA). April 1999, pp. 1–7.
5. Hadzagic M., Michalska H., Lefebvre E. Track before detect methods in tracking low-observable targets: a survey. *Sensors & Transducers Magazine*. 2005. Spec. Iss. P. 374–380.
6. Aftanas M., Drutarovsky M. Imaging of the building contours with through the wall UWB radar system. *Radioengineering*. 2009. Vol. 18, N 3. P. 258–264.
7. Carlson B. D., Evans E. D., Wilson S. L. Search radar detection and track with the Hough transform. Part I: System concept. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*. 1994. Vol. 30, N 1. P. 102–108.
8. Carlson B. D., Evans E. D., Wilson S. L. Search radar detection and track with the Hough transform. Part II: Detection statistics. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*. 1994. Vol. 30, N 1. P. 109–115.
9. Carlson B. D., Evans E. D., Wilson S. L. Search radar detection and track with the Hough transform. Part III: Detection performance with binary integration. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*. 1994. Vol. 30, N 1. P. 116–125.
10. Moyer L. R., Spak J., Lamanna P. A. Multi-dimensional Hough transform-based track-before-detect technique for detecting weak targets in strong clutter backgrounds. *IEEE*

- Transactions on Aerospace and Electronic System*. 2011. Vol. 47, N 4. P. 3062–3068.
11. Wu X. F., Wang X. S., Lu H. Z. Motion feature extraction for stepped frequency radar based on Hough transform. *IET Radar, Sonar & Navig.* 2010. Vol. 4, N 1. P. 17–27.
  12. Zeng J. K., He Z. S. Detection of weak target for MIMO radar based on Hough transform. *Journal of Systems Engineering and Electronics*. 2009. Vol. 20, N 1. P. 76–80.
  13. Sugak V. G., Sugak A. V. Phase Spectrum of Signals in Ground Penetrating Radar Applications. *IEEE Trans. on Geoscience & Remote Sensing*. 2010. Vol. 48, N 4. P. 1760–1767.
  14. Wilson S. L., Carlson B. D. Radar detection in multipath. *IEE Proc. of Radar and Sonar Navig.* 1999. Vol. 146, N 1. P. 45–54.
  15. Guo R., Hao M., Li M., Ni Y., Cheng Z. Small targets detection in low resolution sea clutter. In: *Proc. of Asia-Pacific Microwave Conf.* Hong Kong & Macau (China). 16–20 Dec. 2008. P. 1–4.
11. WU, X. F., WANG, X. S., LU, H. Z., 2010. Motion feature extraction for stepped frequency radar based on Hough transform. *IET Radar, Sonar & Navig.* Vol. 4, no. 1, pp. 17–27.
  12. ZENG, J. K., HE, Z. S., 2009. Detection of weak target for MIMO radar based on Hough transform. *J. Systems Engineering and Electronics*. Vol. 20, no. 1, pp. 76–80.
  13. SUGAK, V. G., SUGAK, A. V., 2010. Phase Spectrum of Signals in Ground Penetrating Radar Applications. *IEEE Trans. on Geoscience & Remote Sensing*. Vol. 48, no. 4, pp. 1760–1767.
  14. WILSON, S. L., CARLSON, B. D., 1999. Radar detection in multipath. *IET Radar, Sonar & Navig.* Vol. 146, no. 1, pp. 45–54.
  15. GUO, R., HAO, M., LI, M., NI, Y., CHENG, Z., 2008. Small targets detection in low resolution sea clutter. In: *Proc. of Asia-Pacific Microwave Conference*. Hong Kong & Macau (China), 16–20 Dec. 2008. P. 1–4.

## REFERENCES

1. LIANG, J., LIANG, Q., 2010. Outdoor propagation channel modeling in foliage environment. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Vol. 59, no. 5, pp. 2243–2252.
2. MENG, Y. S., LEE, Y. H., NG, B. C., 2009. Empirical near ground path loss modeling in a forest at VHF and UHF bands. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Vol. 57, no. 5, pp. 1461–1468.
3. DEHMOLLAIAN, M., SARABANDI, K. 2006. Electromagnetic scattering from foliage camouflaged complex targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 44, no. 10, pp. 2698–709.
4. DAVIS, M. E., TOMLINSON, P. G. and MALONY, R. P., 1999. Technical challenges in ultrawideband radar development for target detection and terrain mapping. In: *Proc. IEEE Radar Conf.* Boston (MA), April 1999, pp. 1–7.
5. HADZAGIC, M., MICHALSKA, H., LEFEBVRE, E., 2005. Track before detect methods in tracking low-observable targets: a survey. *Sensors & Transducers Magazine*. Spec. Iss., pp. 374–380.
6. AFTANAS, M., DRUTAROVSKY, M., 2009. Imaging of the building contours with through the wall UWB radar system. *Radioengineering*. Vol. 18, no. 3, pp. 258–264.
7. CARLSON, B. D., EVANS, E. D., WILSON, S. L., 1994. Search radar detection and track with the Hough transform. Part I: System concept. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*. Vol. 30, no. 1, pp. 102–108.
8. CARLSON, B. D., EVANS, E. D., WILSON, S. L., 1994. Search radar detection and track with the Hough transform. Part II: Detection statistics. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*. 1994. Vol. 30, no. 1, pp. 109–115.
9. CARLSON, B. D., EVANS, E. D., WILSON, S. L., 1994. Search radar detection and track with the Hough transform. Part III: Detection performance with binary integration. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*. 1994. Vol. 30, no. 1, pp. 116–125.
10. MOYER, L. R., SPAK, J., LAMANNA, P. A., 2011. Multi-dimensional Hough transform-based track-before-detect technique for detecting weak targets in strong clutter backgrounds.

Рукопись поступила 26.12.2016.

V. G. Sugak

## USAGE OF RADAR SIGNAL PHASE STRUCTURE ENTROPY FOR DETECTION OF GROUND OBJECTS WEAK MOVEMENT BEHIND FOLIAGE OF SHRUBS AND TREES

The article presents the results of research on opportunities of revealing a weak target movement in foliage-penetration environment with the use of Stepped Frequency Continuous Wave Radar in the frequency range of 1 200...1 800 MHz. The entropy weighed coherent integration (EWCI) algorithm is adopted to phase fluctuations of radar returns and it allows the multipath effects to be mitigated and the detectability and visibility of targets behind foliage brushes and trees to become significantly better.

**Key words:** radar system, target detection in the foliage environments, phase spectrum, entropy.

В. Г. Сугак

## ВИКОРИСТАННЯ ЕНТРОПІЇ ФАЗОВОЇ СТРУКТУРИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ РУХУ ОБ'ЄКТІВ ЗА ЛИСТЯМ КУЦІВ ТА ДЕРЕВ

У статті наведено результати дослідження можливостей виявлення слабкого руху цілей (людей або об'єктів) за листям чагарників та дерев при застосуванні радіолокатора з покровою змінною несучої частоти у діапазоні 1 200...1 800 МГц. В якості основного методу обробки сигналів запропоновано використовувати зважені ентропією флуктуації фази відбитих сигналів у каналах дальності. Показано, що використання такого зважування дозволяє суттєво збільшити вірогідність спостереження та виявлення цих об'єктів.

**Ключові слова:** радіолокаційна система, виявлення об'єктів за листям, фазочастотний спектр, ентропія.