

І.М. Миценко, О.М. Роєнко

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна
E-mail: rk@ire.kharkov.ua

Про можливість оцінювання відстані до цілі методами пасивної радіолокації при далекому тропосферному поширенні радіохвиль

Предмет та мета роботи. Прогрес у галузі розроблення засобів зв'язку передбачає використання в сучасних радіолокаційних станціях (РЛС) нової елементної бази і технологій обробки сигналів. Останніми роками все більшу увагу розробників радіолокаційних комплексів привертають пасивні системи. Проте вони не дозволяють визначати дальність до об'єкту, що досліджується, за даними приймання сигналів тільки однієї станції. У роботі запропоновано концепцію визначення дальності до цілі при пасивній радіолокації і далекому тропосферному поширенні радіохвиль на основі дистанційної залежності статистичних параметрів амплітудних флуктуацій сигналу, що приймається від цілі за межами радіогоризонту.

Методи та методологія роботи. Основним механізмом поширення радіохвиль за межами радіогоризонту є далеке тропосферне розсіяння радіохвиль на неоднорідностях тропосфери. Ці неоднорідності безперервно змінюють свою форму і розміри, переміщуються в просторі. Результуюче поле в точці приймання визначається додаванням енергії радіохвиль, розсіяної неоднорідностями в освітлюваній області простору, яка змінює свою висоту залежно від відстані. Це призводить до залежності статистичних параметрів флуктуацій сигналу, що приймається, від відстані. Після статистичної обробки флуктуацій сигналу, що приймається, можна оцінити відстань до спостережуваної цілі. Для вирішення поставленого завдання проведено детальний аналіз результатів експериментальних досліджень щодо поширення радіохвиль довжиною 3 і 50 см над Охотським морем на трасах завдовжки до 500 км.

Результати роботи. Для оцінки відстані до цілі при пасивній радіолокації можна використовувати стандартне відхилення σ амплітуди прийнятого сигналу.

Висновки. На основі дистанційної залежності статистичних параметрів амплітудних флуктуацій відбитого від цілі сигналу можна оцінити відстань до цілі при пасивній радіолокації в сантиметровому, дециметровому і метровому діапазонах хвиль. Іл. 5. Бібліогр.: 7 назв.

Ключові слова: пасивна радіолокація, радіогоризонт, далеке тропосферне поширення.

Завдяки стрімкому прогресу в галузі розроблення засобів зв'язку, сучасні радіолокаційні станції (РЛС) стали використовувати нову елементну базу і технології обробки сигналів, проте базові системні концепції, закладені в основу радіолокації, залишаються практично незмінними. Як правило, РЛС випромінює ідентичний за параметрами сигнал упродовж всього періоду роботи. У кожен момент часу вона випромінює тільки на одній частоті та отримує відгук тільки від невеликої області простору, використовуючи його механічне сканування. На цей час при розробці методів і засобів радіолокації велику увагу приділяють пасив-

ним системам, які грають все більш важливу роль у сучасних і перспективних радіолокаційних комплексах [1]. У системах пасивної локації відсутній активний опромінювач і є тільки система приймачів, пов'язаних один з одним певним чином. При пасивній радіолокації сама цілі є джерелом випромінювання, а РЛС виконує функції приймального пристрою, призначеного для визначення напрямку на це джерело. Перевага пасивної системи — відсутність випромінювання, але при цьому, на відміну від активної локації, пасивна не дозволяє визначити дальність до об'єкту, що досліджується, за даними приймання сигналів тільки однієї стан-

ції. Це, поза сумнівом, є істотним недоліком. Для повного обчислення координат об'єкту необхідно використати спільні дані декількох (більше двох) РЛС, віддалених одна від одної на відому відстань, і будь-який з відомих способів обробки: триангуляційний, різницево-далекомірний або кутомірно-різницево-далекомірний [2, 3]. Застосування декількох опорних приймальних пунктів істотно здорожує та ускладнює систему, і не завжди здійсненне через територіальні обмеження. Проте пасивна радіолокація має переваги при виявленні цілі за межами радіогоризонту на великих відстанях, оскільки випромінюваний ціллю сигнал проходить відстань тільки в один бік — від цілі до приймального пристрою РЛС, а при активній радіолокації ослаблюється вдвічі, проходячи від РЛС до цілі і назад. З цієї причини проблема знаходження дальності та координат цілі методами пасивної радіолокації є однією з головних і простого рішення не має досі.

Метою роботи є створення концепції визначення дальності до цілі методами пасивної радіолокації при далекому тропосферному поширенні (ДТП) радіохвиль на основі дистанційної залежності статистичних параметрів амплітудних флуктуацій сигналу, що приймається від цілі за межами радіогоризонту.

Як відомо [4], одним з основних механізмів поширення радіохвиль за межами радіогоризонту є далеке тропосферне розсіяння радіохвиль на неоднорідностях тропосфери, яке існує практично постійно. Фізичними основами ДТП є розсіяння або відбиття радіохвиль неоднорідностями тропосфери (рис. 1).

Реальні сигнали корабельних РЛС при пасивній радіолокації можна виявляти на відстанях у декілька сотень кілометрів. Експериментальні дослідження авторів при пасивній радіолокації над водною поверхнею у 3 см діапазоні радіохвиль практично завжди давали відстань 500...600 км. Координати цілей були відомі.

Розглянемо визначення відстані до цілі, коли координати її не відомі. Як видно з рис. 1, при збільшенні відстані від пасивної РЛС (точка А) до випромінюючої цілі (точка В) висота об'єму взаємодії діаграм направленості антен переміщується на значну висоту в тропосфері ($h_2 \gg h_1$), а це призводить до того, що в перевипромінюванні сигналу беруть участь інші

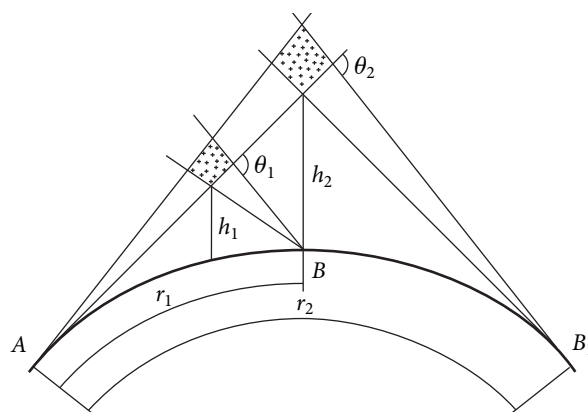


Рис. 1. Загоризонтне поширення радіохвиль: А — пасивна РЛС; В, В₁ — різні положення випромінюючої цілі; h_1 , h_2 — висоти об'ємів взаємодії діаграм направленості антен; r_1 , r_2 — відстані до цілі; θ_1 , θ_2 — кути взаємодії діаграм направленості антен

неоднорідності тропосфери з іншими статистичними параметрами. Це у свою чергу призводить до залежності статистичних параметрів флуктуацій сигналу, що приймається, від відстані, що підтверджено в експериментах [5]. Наприклад, когерентна складова флуктуацій сигналу, що приймається, істотно перевищує некогерентну складову на відстанях 100...200 км, а на відстанях 400...600 км в основному переважає некогерентна складову і так далі. Таких статистичних параметрів декілька. Тому після статистичної обробки цих випадкових процесів (флуктуацій сигналу, що приймається) можна оцінити відстань до випромінюючої цілі. Поза сумніву, існує багато тонкощів, які необхідно враховувати при обробці сигналу, що приймається: ширина діаграм направленості антен, поляризація та ін.

Розглянемо фізичні процеси, що відбуваються при ДТП. Тропосфера — це середовище, в якому знаходяться неоднорідності різних розмірів, що безперервно змінюють свою форму і переміщуються в просторі, коефіцієнти заломлення яких трохи відрізняються від коефіцієнта заломлення навколишнього повітряного простору. Кожна така неоднорідність викликає або розсіяння, або відбиття (якщо має достатні розміри) радіохвиль, що поширюються. Перевипромінювана неоднорідностями енергія радіохвиль приймається на земній поверхні в зоні прямої видимості (рис. 1). Результуюче поле в точці приймання визначається додаванням енергії радіохвиль, перевипромінюваної

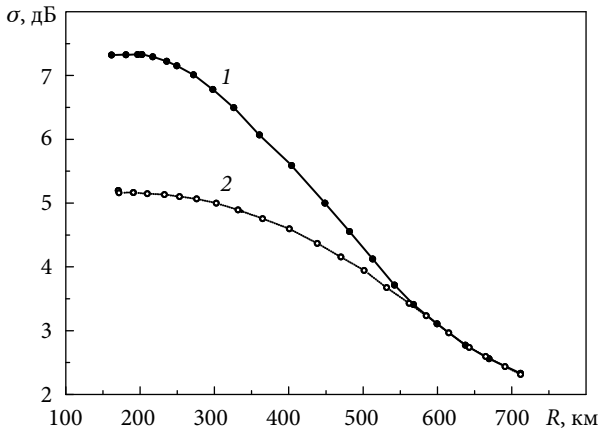


Рис. 2. Залежність середніх значень стандартного відхилення від довжини траси (крива 1 – літо, крива 2 – зима)

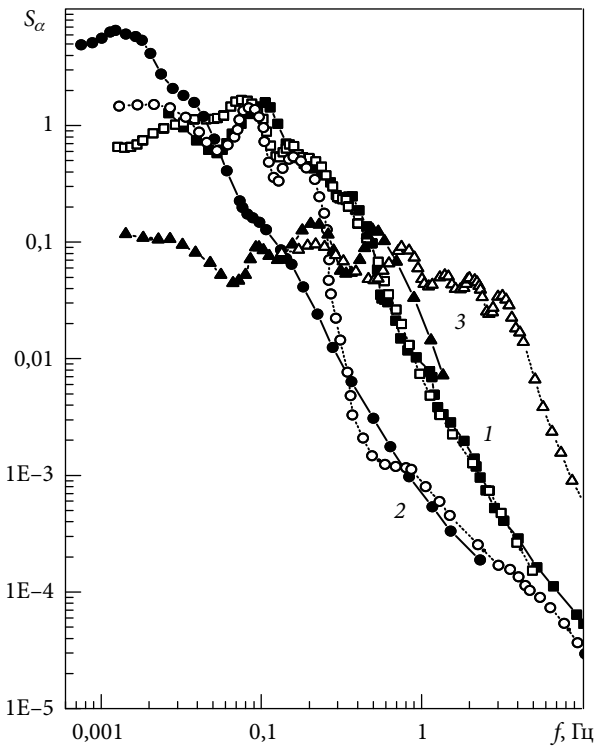


Рис. 3. Приклади спектрів, що пронормовані на квадрат середнього значення амплітуд у кожній реалізації для різних відстаней: крива 1 – 140...160 км, крива 2 – 250 км, крива 3 – 200 км

усіма неоднорідностями, що знаходяться в зоні прямої видимості. Як видно з рис. 1, в перевипромінюванні радіохвиль бере участь деякий певний об’єм тропосфери [6], який утворюється перетином діаграм направленості передавальної та приймальної антен. У разі пасивної радіолокації діаграма направленості знайденої випромінюючої цілі невідома, тому можна вважати випромінюючу антену цілі слабо-

спрямованою. Неоднорідності, що знаходяться в об’ємі перевипромінювання, є вторинними джерелами випромінювання. Оскільки діелектричні проникності неоднорідностей навколишнього середовища мало відрізняються, то велика частина енергії радіохвилі прямує через неоднорідності і тільки невелика її частина розсіюється в напрямі на точку приймання. З цієї причини механізм далекого тропосферного розсіяння характеризується при поширенні радіохвиль великим ослабленням сигналу і в активній радіолокації не застосовується.

Для характеристики розсіяння радіохвиль використовують параметр, який називають коефіцієнтом розсіяння γ , що дорівнює відношенню потужності, розсіяної одиницею об’єму в одиниці тілесного кута в напрямі на приймач, до густини потоку енергії радіохвиль, що падають на об’єм перевипромінювання. Відповідно до теорії розсіяння Букера і Гордона [7], вираз для коефіцієнту розсіяння має вигляд

$$\gamma = \frac{\overline{\Delta \epsilon}^2}{\lambda} \frac{\left(\frac{2\pi l_{\text{сеп}}}{\lambda} \right)^2 \sin^2 \chi}{\left(1 + \left(\frac{4\pi l_{\text{сеп}} \sin(\theta/2)}{\lambda} \right)^2 \right)^2}, \quad (1)$$

де χ – кут між вектором електричного поля хвилі в місці розсіяння і напрямом на приймальний пункт; $\overline{\Delta \epsilon}^2$ – середній квадрат відхилення діелектричної проникності (інтенсивність флуктуацій ϵ); $l_{\text{сеп}}$ – середня відстань між точками вимірювання флуктуацій ϵ у тропосфері; λ – довжина хвилі; θ – кут розсіяння.

Дуже важливою особливістю ДТП, яка може допомогти вирішити питання визначення дальності до цілі при пасивній радіолокації, є залежність інтенсивності флуктуацій діелектричної проникності $\overline{\Delta \epsilon}^2$ від висоти над поверхнею Землі. Як відомо [4], величина інтенсивності флуктуацій $\overline{\Delta \epsilon}^2$ зі збільшенням висоти над земною поверхнею зменшується. У середньому зміна $\overline{\Delta \epsilon}^2$ з висотою апроксимується степеневу залежністю

$$\overline{\Delta \epsilon}^2 = \frac{C_p}{h^m}, \quad (2)$$

де C_p – коефіцієнт пропорційності (величину $\overline{\Delta \epsilon}^2$ визначають на висоті $h = 1$ км над

земною поверхнею), $m = 0,16$ (граничний випадок $m \approx 1$).

При зміні відстані між ціллю та приймальним пунктом РЛС змінюється і висота нижньої межі об'єму перевипромінювання (рис. 1): чим більше відстань R , тим більше висота h_0 об'єму перевипромінювання і менше $\overline{\Delta \varepsilon^2}$. Висоту h_0 визначають за виразом

$$h_0 = \frac{R^2}{8a_e}, \quad (3)$$

де a_e — еквівалентний радіус Землі (8 500 км).

Таким чином, спостерігається залежність величини інтенсивності флуктуацій $\overline{\Delta \varepsilon^2}$ від відстані: зі збільшенням відстані вона зменшується. Безперервні коливання рівня сигналу, що приймається, є однією із закономірностей ДТП. Швидкі завмирання, що спостерігаються впродовж коротких періодів у сантиметровому та дециметровому діапазонах і довших періодів у метровому діапазоні, викликаються багатопроневістю [6]. Вони з'являються внаслідок додавання в місці приймання безлічі променів, що надходять від різних розсіювальних або відбиваючих неоднорідностей тропосфери. У результаті завмирань рівень сигналу за певний проміжок часу може набувати різних значень і є випадковою змінною величиною. З цих причин для оцінки параметрів сигналу, що приймається, необхідно користуватися поняттями теорії ймовірності. Повне уявлення про характер завмирань дає функція розподілу рівнів сигналів.

Експериментальні дослідження рівня сигналу, що приймається, показали, що при швидких завмираннях функція розподілу найчастіше підкоряється релеївському або узагальненому релеївському законам [4]. Як відомо, релеївському закону розподілу підкоряється результуюча амплітуда сигналу при додаванні більше чотирьох складових з довільними амплітудами і фазами, а узагальненому релеївському — при складових з незмінною амплітудою та фазою. Тому можна вважати, що швидкі завмирання підкоряються релеївському закону розподілу.

Величина стандартного відхилення σ дорівнює відхиленню рівня сигналу від медіанного значення, де ймовірність падіння сигналу нижче цього рівня складає 16 або 84 % [6].

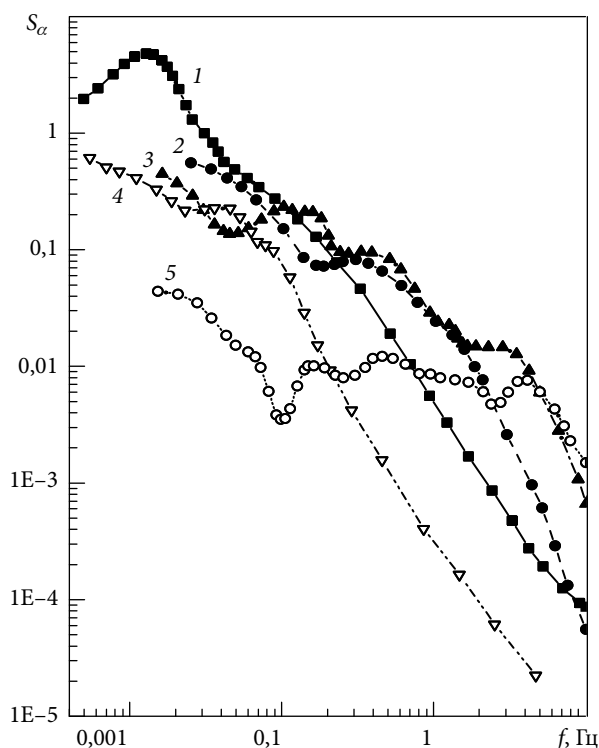


Рис. 4. Спектри флуктуацій амплітуди сигналів у сантиметровому діапазоні радіохвиль для різних відстаней: крива 1 — 200 км, крива 2 — 440 км, крива 3 — 175 км, крива 4 — 460 км, крива 5 — 250 км

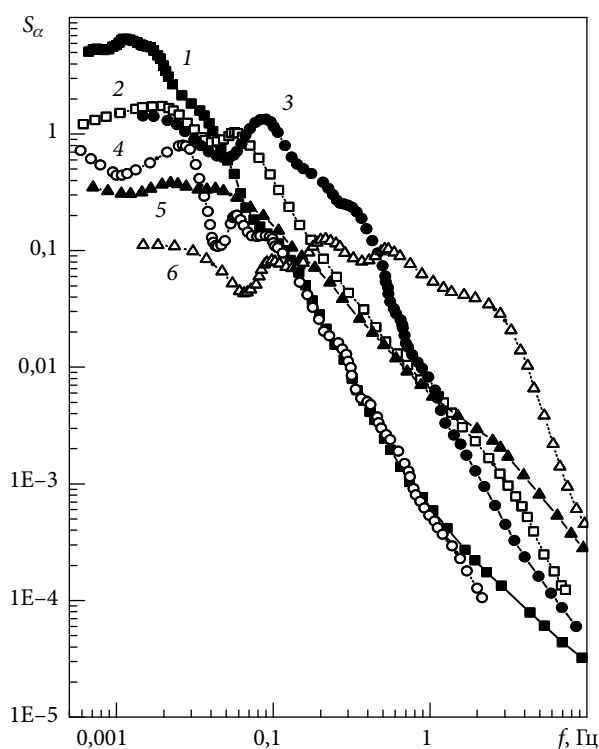


Рис. 5. Спектри флуктуацій амплітуди сигналів у дециметровому діапазоні радіохвиль для різних відстаней: крива 1 — 200 км, крива 2 — 110 км, крива 3 — 150 км, крива 4 — 63 км, крива 5 — 470 км, крива 6 — 250 км

На рис. 2 показано залежність середніх значень величини стандартного відхилення від відстані [6]. Як видно з рис. 2, найбільшого значення величина σ досягає влітку на відстанях 150...200 км. Взимку на цих відстанях рівень σ виявляється дещо нижчим. Для вирішення нашого завдання важливо, що зі збільшенням відстані значення σ монотонно зменшується і на великих відстанях «літо» і «зима» мало відрізняються одне від одного. Це говорить про те, що структура найбільш високих шарів тропосфери влітку і взимку мало відрізняється. Таким чином, за величиною стандартного відхилення σ сигналу від цілі можна оцінювати відстань, на якій знаходиться ціль, при пасивній радіолокації.

Окрім цього, важливою характеристикою швидких завмирань є розподіл частотних завмирань, статистичні характеристики яких також залежать від відстані. У 1980-х рр. фахівцями ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України були проведені експериментальні дослідження поширення радіохвиль довжиною 3 і 50 см над Охотським морем на трасах довжиною до 500 км. На рис. 3–5 наведено спектри амплітудних завмирань на різних відстанях.

У цих експериментах не ставилося завдання досліджувати залежність параметрів швидких флуктуацій від дальності до цілі. Проте отримані графіки залежностей (рис. 3–5) свідчать про те, що зі збільшенням відстані швидкі флуктуації стають основними в спектрі сигналу, що приймається. Точність визначення дальності при використанні цього методу є приблизною і вимагає подальшого теоретичного та експериментального дослідження.

Висновки. У результаті проведеного аналізу існуючої теорії ДТП і спостереження експериментальних даних можна зробити такі висновки:

- Оцінювати відстань до цілі методом пасивної радіолокації в сантиметровому, дециметровому і метровому діапазонах при далекому тропосферному поширенні радіохвиль можливо на основі дистанційної залежності статистичних параметрів амплітудних флуктуацій сигналу, що приймається від цілі.
- Пропонований авторами метод надає можливість оцінювати не лише дальність до цілі, але й механізм поширення радіохвиль (відбиття від інверсійних шарів, розсіяння на неоднорідностях тропосфери або їх спільну дію).

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Wiesbeck W., Sit L. Radar 2020: The Future of Radar Systems. 2014 *Int. Radar Conf.* (13–17 October 2014). Lille, France, 2014. P. 265–268.
2. Быстрова Р.П., Загорин С.К., Соколов А.В., Федорова А.В. *Пассивная радиолокация: методы обнаружения объектов*. Москва: Радиотехника, 2008. 320 с.
3. *Вопросы перспективной радиолокации*. Под ред. А.В. Соколова. Москва: Радиотехника, 2003. 512 с.
4. Дальнее тропосферное распространение ультракоротких радиоволн. Под ред. Б.А. Введенского. Москва: Сов. радио, 1965. 415 с.
5. *Радиофизические исследования Мирового океана*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. АН Украины. Отв. ред. В.Б. Разсказовский. Харьков, 1992. 220 с.
6. Давыденко Ю.И. *Дальняя тропосферная связь*. Москва: Воениздат, 1968. 212 с.
7. Villars F., Weiskopf V.F. On the scattering of radio waves by turbulent fluctuations of the atmosphere. *Proc. IRE*. 1955. Vol. 43, Iss. 10. P. 1232–1235.

Стаття надійшла 28.09.2021

REFERENCES

1. Wiesbeck, W., Sit, L., 2014. Radar 2020: The Future of Radar Systems. In: *2014 Int. Radar Conf.* Lille, France, 13–17 Oct. 2014, pp. 265–268.
2. Bystrova, R.P., Zagorin, S.K., Sokolov, A.V., Fedorova, A.V., 2008. *Passive radar: methods for object detection*. Moscow: Radiotekhnika Publ. (in Russian).
3. Sokolov, A.V. ed., 2003. *Questions of perspective radiolocation*. Moscow: Radiotekhnika Publ. (in Russian).
4. Vvedensky, B.A. ed., 1965. *Distant troposphere propagation of ultra-short radio waves*. Moscow: Sov. Radio Publ. (in Russian).
5. Razskazovsky, V.B. ed., 1992. *Radiphysical investigations of World ocean*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. (in Russian).
6. Davydenko, Yu.I., 1968. *Distant troposphere communication*. Moscow: Mil. Publ. House (in Russian).
7. Villars, F., Weiskopf, V.F., 1955. On the scattering of radio waves by turbulent fluctuations of the atmosphere. *Proc. IRE*, 43(10), pp. 1232–1235.

Received 28.09.2021

I.M. Mytsenko, O.M. Roenko

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NASU
12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

ON TARGET DISTANCE ESTIMATION BY PASSIVE RADAR
UNDER FAR-TROPOSPHERIC RADIO WAVE PROPAGATION

Subject and Purpose. The progress in the development of communication means requires a brand-new radar-component base and state-of-the-art technologies of signal processing. Last years, passive radar systems have become increasingly important. Yet such a shortcoming as poor estimation of the target distance takes place when the signal reception is only provided by a single station. The present work suggests a concept of the object distance determination by passive radar means under far-tropospheric radio wave propagation upon that the statistical parameters of amplitude fluctuations of the target reflection beyond the radiohorizon are distance dependent.

Methods and Methodology. The basic mechanism of radio wave propagation beyond the radiohorizon is a phenomenon of tropospheric scatter on tropospheric heterogeneities in the upper tropospheric layers. These heterogeneities continuously change form and size and move through the space. The resulting electromagnetic field at the reception point represents additively combined radio wave powers scattered by all heterogeneities in the illuminated area that varies its height depending on the distance so that the statistical parameters of received signal fluctuations are distance dependent. After statistical processing of received signal fluctuations, the target distance can be determined. The present work examines radiowave propagation of the 3 cm and 50 cm waves over the Sea of Okhotsk with target distances up to 500 km.

Results. For the target distance estimation by passive radar means, the standard deviation value, σ , of the received signal amplitude can be employed.

Conclusion. The distance dependence of the statistical parameters of amplitude fluctuations of the target signal allows the target distance to be estimated by a passive radar in the centimeter, decimeter and meter wave ranges.

Key words: *passive radar, radio horizon, far-tropospheric propagation.*