

УДК 621.396.662.072.078

С. В. КОЗЕЛКОВ, доктор техн. наук, професор;

Н. В. КОРШУН, канд. техн. наук, доцент,

Державний університет телекомунікацій, Київ

МЕТОД АДАПТИВНОЇ ДЕМОДУЛЯЦІЇ РАДІОСИГНАЛІВ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

Розглянуто можливості вдосконалення завадостійкості демодуляції сигналу міліметрового діапазону хвиль за наявності частотно-селективних завмирань.

Ключові слова: крайвисокочастотний радіосигнал; автокореляційний прийом; оптимальний когерентний прийом; частотно-селективні завмирання.

Вступ

Завдяки особливостям радіохвиль міліметрового діапазону визначається їх широке застосування в системах радіолокації, дистанційного зондування, навігації та зв'язку. Сьогодні питання обробки таких сигналів набуває надзвичайної актуальності, оскільки саме цей діапазон хвиль має перспективу щодо використання його в телекомунікаційних системах мереж 5-го покоління 5G.

Запропонований у статті метод переважно може бути використаний для вдосконалення високошвидкісних широкосмугових систем передавання інформації по тропосферних радіоканалах міліметрового діапазону довжин хвиль.

Основна частина

Маємо демодулятор сигналів, що містить у собі вхідний смуговий фільтр, лінію затримки, перемножувач, інтегратор і вирішувачий пристрій, причому входом цього демодулятора сигналів є вхід смугового фільтра. Вихід смугового фільтра підімкнено до входу лінії затримки і з'єднано з другим входом перемножувача, а вихід лінії затримки приєднано до першого входу перемножувача. При цьому вихід перемножувача через інтегратор сполучено із входом вирішувачого пристрою, тоді як вихід вирішувачого пристрою є виходом демодулятора сигналів.

Недоліком такого демодулятора сигналів є низька завадостійкість, оскільки він реалізує автокореляційну схему прийому, яка при відомій формі переданого сигналу, маючи однакове відношення енергії елемента сигналів на вході демодулятора (при автокореляційній і когерентній схемах прийому) до спектральної щільності білого шуму, програє майже в 10 разів оптимальній когерентній схемі.

Оскільки, як відомо, імовірність помилки автокореляційного прийому можна визначити з рівняння

$$P_{\text{авт}} = 0,5 \exp(-0,5h^2), \quad (1)$$

де h^2 — відношення енергії елемента сигналу на вході демодулятора до спектральної щільності білого шуму, а ймовірність помилки оптимального когерентного прийому — зі співвідношення

$$P_{\text{ког}} = 2F(\sqrt{2}h) \left[1 - F(\sqrt{2}h) \right], \quad (2)$$

де $F(\cdot)$ — інтеграл помилок, то, узявши $F(\cdot)$ і розрахувавши значення величин для (1) і (2) при $h = 2$, дістанемо:

$$\begin{aligned} P_{\text{авт}} &\approx 0,05 = 5 \times 10^{-2}; \\ P_{\text{ког}} &\approx 0,005 = 5 \times 10^{-3}. \end{aligned}$$

Отже, маємо:

$$\frac{P_{\text{авт}}}{P_{\text{ког}}} = 10 \text{ раз.}$$

Із відомих пристроїв найбільш близьким за своєю технічною суттю прототипом є демодулятор сигналу, що містить перемножувач, систему відновлення носійної, систему тактової синхронізації і вирішувачий пристрій, причому входом демодулятора сигналів є з'єднані між собою сигнальний вхід перемножувача і вхід системи відновлення носійної. Вхід системи відновлення носійної підімкнено до опорного входу перемножувача, вихід якого приєднано до першого входу вирішувачого пристрою і з'єднано зі входом системи тактової синхронізації. Вихід системи тактової синхронізації підімкнено до другого входу вирішувачого пристрою, вихід котрого є виходом демодулятора сигналу.

Проте такий демодулятор сигналів характеризується значними втратами завадостійкості під час прийому радіохвиль міліметрового діапазону довжин хвиль у дисперсійних тропосферних каналах із частотно-селективними завмираннями. Наявність частотно-селективних завмирань у тропосферних

каналах зумовлена нелінійністю фазочастотної характеристики $\varphi(f)$ використовуваної радіолінії. Це явище спричиняє збільшення фазових спотворень $\Delta\varphi$, тому при проходженні вкрайвисокочастотних радіосигналів через канал із частотно-селективними завмираннями (тобто по тропосферній радіолінії) форма сигналу спотворюється. Таке спотворення значно знижує стійкість відомих демодуляторів сигналу, що реалізують когерентний прийом, оскільки в разі когерентного прийому обчислюється прийнятий сигнал $x(t)$ на можливі варіанти $S_1(t)$ і $S_2(t)$ переданого сигналу, відомі в демодуляторі сигналів, тобто

$$\int_0^T x(t)S_1(t)dt \ll \int_0^T x(t)S_2(t)dt.$$

Зі збільшенням фази в їх спотворенні $\Delta\varphi$ збільшується дисперсія фази $\delta\varphi$ і відповідно зменшується амплітуда сигналу, тобто ймовірність помилки когерентного прийому визначатиметься рівністю

$$P_{\text{пом. ког}} = 2F(\sqrt{2h \cos \Delta\varphi}) \left[1 - F(\sqrt{2h \cos \Delta\varphi}) \right]. \quad (3)$$

У виразі (2) передбачалося, що дисперсія фази каналу поширення радіохвиль визначається рівномірною АЧХ і лінійною ФЧХ. Однак під час поширення радіосигналів міліметрового діапазону довжин хвиль внаслідок випадання гідрометеорів виникають частотно-селективні завмирання, спричиняючи нерівномірний розподіл АЧХ і нелінійність ФЧХ тропосферного радіоканалу. При цьому фазові спотворення модульованих коливань призводять до зміщення оцінок інформаційних параметрів через помилки когерентного відновлення носійної, що значно знижує стійкість демодулятора.

Дійсно, за наявності на трасі поширення міліметрових радіохвиль частотно-селективних завмирань, що викликають фазові спотворення $|\Delta\varphi| = 40^\circ \pm 60^\circ$, відповідно до (3) стійкість демодулятора сигналів знижується на 2...4 дБ для ВФМ-2 і на 3,5...5 дБ для ВФМ-4 (залежно від виду фазочастотної характеристики $\varphi(f)$ використовуваної радіолінії). Добором значень $\cos\Delta\varphi$ у формулі (3) можна легко встановити, що при $\Delta\varphi \geq 50^\circ$ імовірність помилки когерентного прийому зростає порівняно з імовірністю помилки автокореляційного прийому, використовуваного в тих самих умовах. Для ВФМ-2 при $\Delta\varphi = 60^\circ$ маємо:

$$\frac{P_{\text{ког. з}}^{**}}{P_{\text{ког. б. з}}^*} = 30 \text{ раз,}$$

де $P_{\text{ког. з}}^{**}$, $P_{\text{ког. б. з}}^*$ — ймовірність помилки при когерентному прийомі в каналі відповідно з частотно-селективними завмираннями і без частотно-селективних завмирань.

З огляду на це за наявності частотно-селективних завмирань, що їх спричинює нелінійність фазочастотної характеристики використовуваної радіолінії, доцільно переходити на автокореляційний прийом, стійкість якого не залежить від спотворень форми сигналу

$$\int_0^T x_1^2(t)dt \ll \int_0^T x_2^2(t)dt.$$

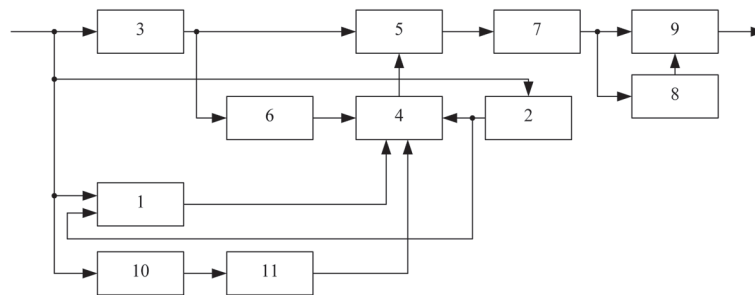
Метою запропонованого методу є підвищення завадостійкості демодуляції сигналу міліметрового діапазону хвиль, що пройшов через турбулентну тропосферу.

Зазначена мета досягається завдяки тому, що демодулятор сигналу містить у собі перемножувач, систему відновлення носійної, систему тактової синхронізації, вирішуючий пристрій, причому вход демодулятора сигналів є вход системи відновлення носійної, вихід системи тактової синхронізації з'єднано з другим входом вирішуючого пристрою, а вихід вирішуючого пристрою є виходом демодулятора сигналів. Також уведено аналізатор, вхідний фільтр, лінію затримки, комутатор сигналів, інтегратор, причому з'єднані між собою сигнальний вхід аналізатора і вхід вхідного фільтра підімкнено до входу демодулятора сигналу, а вихід вхідного фільтра з'єднано зі входом лінії затримки та сигнальним входом перемножувача. Вихід лінії затримки підімкнено до першого входу комутатора сигналів, тоді як вихід системи відновлення носійної з'єднано з опорним входом аналізатора і приєднано до другого входу комутатора сигналів. Вихід аналізатора з'єднано з керуючим входом комутатора сигналів, вихід якого підімкнено до опорного входу перемножувача. Вихід перемножувача приєднано до входу інтегратора, а вихід інтегратора з'єднано з першим входом вирішуючого пристрою і підімкнено до входу системи тактової синхронізації.

Демодулятор сигналів відрізняється тим, що введений аналізатор містить два смугових фільтра, два обмежувача, два фазових детектора, два інтегратора, віднімач і піковий детектор, причому з'єднані між собою входи смугових фільтрів є сигнальним входом аналізатора. Вихід першого смугового фільтра через окремий обмежувач з'єднано з першим входом першого фазового детектора, а вихід другого смугового фільтра через окремий обмежувач підімкнено до першого входу другого фазового

детектора. З'єднані між собою другі входи фазових детекторів є опорним входом аналізатора, причому вихід кожного фазового детектора через окремий інтегратор приєднано до окремого входу віднімача, вихід якого з'єднано зі входом пікового детектора і є виходом аналізатора.

Функціональну схему демодулятора сигналів зображено на рисунку, де позначено: аналізатор 1, система відновлення носійної 2, вхідний фільтр 3, комутатор сигналів 4, перемножувач 5, лінія затримки 6, інтегратор 7, система тактової синхронізації 8, вирішуючий пристрій 9, блок контролю 10, компаратор 11, причому входом демодулятора сигналів є з'єднані між собою сигнальний вхід аналізатора 1, вхід системи відновлення носійної 2, вхід вхідного фільтра 3 і вхід блока контролю 10. Вихід вхідного фільтра 3 з'єднано із сигнальним входом перемножувача 5 і підімкнено до входу лінії затримки 6, а вихід лінії затримки 6 приєднано до першого входу комутатора сигналів 4. Вихід сигналу відновлення носійної 2 з'єднано з опорним входом аналізатора 1 і підімкнено до другого входу комутатора сигналів 4. Вихід аналізатора 1 приєднано до першого керуючого входу комутатора сигналів 4, вихід комутатора сигналів 4 з'єднано з опорним входом перемножувача 5, а вихід перемножувача 5 з'єднано із входом інтегратора 7. Вихід інтегратора 7 підімкнено до першого входу вирішуючого пристрою 9 і з'єднано із входом системи тактової синхронізації 8, причому вихід системи тактової синхронізації 8 з'єднано з другим входом вирішуючого пристрою 9, а вихід вирішуючого пристрою 9 є виходом демодулятора сигналів. Вихід блока контролю 10 з'єднано через компаратор 11 із другим керуючим входом комутатора сигналів 4.



Функціональна схема демодулятора сигналів

Розглянемо детальніше деякі особливості завдань, покладених на структурні складові демодулятора сигналів.

▲ Уведення двох смугових фільтрів, що входять в аналізатор, необхідне для виділення нижньої і верхньої бічної спектральних складових сигналу відповідно до перших і других смугових фільтрів.

▲ Уведення двох обмежувачів, що входять в аналізатор, необхідне для підтримання постійного рівня вхідного сигналу.

▲ Уведення двох фазових детекторів, що входять в аналізатор, необхідне для перетворення сигналів, виділених смуговими фільтрами, і сигналів, що надходять з опорного входу аналізатора, а також виділення напруг, пропорційних до зміни фаз нижньої бічної спектральної складової щодо опорного значення $\varphi - \varphi_n = \Delta\varphi_1$ і верхньої бічної спектральної складової щодо опорного значення $\varphi_n - \varphi = \Delta\varphi_2$.

▲ Уведення двох інтеграторів, що входять в аналізатор, необхідне для усереднення за час $T \gg \frac{2\pi}{\omega_0}$ напруги, пропорційної до приросту фази відповідно нижньої бічної $\Delta\varphi_1$ і верхньої бічної $\Delta\varphi_2$ спектральних складових.

▲ Уведення віднімача, що входить в аналізатор, необхідне для виділення напруги, пропорційної до величини фазових спотворень $\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = 2\varphi - \varphi_n - \varphi_n$.

▲ Уведення пікового детектора, що входить в аналізатор, необхідне для порівняння напруги резонансного сигналу $U_{\Delta\varphi}$ із граничним значенням $U_{\Delta\varphi \text{ доп}} = 50\%$, і за результатами цього порівняння формування керуючої напруги при $U_{\Delta\varphi} \geq U_{\Delta\varphi \text{ доп}}$ дорівнює одиниці, а при $U_{\Delta\varphi} \leq U_{\Delta\varphi \text{ доп}}$ дорівнює нулю.

▲ Уведення комутатора сигналів необхідне для поділу режимів (когерентного і автокореляційного) роботи демодулятора сигналів по керуючій напрузі, що надходить від аналізатора.

▲ Уведення лінії затримки необхідне для затримки вхідного сигналу на проміжок часу (у годинах) $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$, що дозволить за допомогою перемножувача забезпечити добуток часової функції сигналу $\varphi(t)$ на таку саму часову функцію, але зі зрушенням на такт $U(t - T)$.

▲ Уведення вхідного фільтра необхідне для виділення із суміші сигнал-завада корисного радіосигналу.

▲ Уведення інтегратора необхідне для усереднення за час $T \gg \frac{2\pi}{\omega_0}$ напруги, що утворюється на вході перемножувача.

Отже, уведення зазначеної сукупності нових відмінних ознак безпосередньо уможливило досягнення поставленої мети — підвищити завадостійкість демодуляції вкрайвисокочастотних радіосигналів завдяки оперативному оцінюванню поточного стану тропосферної траси поширення радіохвиль і забезпечити подальший адаптивний перехід від режиму оптимального когерентного прийому до режиму автокореляційного прийому, а також, відповідно, у зворотному напрямку, але за наявності та відсутності частотно-селективних замирань у каналі передавання вкрайвисокочастотного радіосигналу.

Висновок

Запропонований метод дає змогу підвищити завадостійкість демодуляції сигналу міліметрового діапазону хвиль, що пройшов через турбулентну тропосферу, та переважно може бути використаний для вдосконалення високошвидкісних ширококутових систем передавання інформації по тропосферних радіоканалах міліметрового діапазону довжин хвиль.

Список використаної літератури

1. Толубко, В. Б. Формування багатопозиційного сигналу технологій 5G на базі фазорізницевої модуляції високого порядку / В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, С. В. Козелков // Зв'язок.— 2016.— № 4.— С. 5–7.
2. Стеклов, В. К. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку: підручник для вузів / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман, Є. В. Кільчицький.— К.: Техніка, 2004.— 576 с.
3. Марков, Г. Т. Антенны / Г. Т. Марков, Д. М. Сазонов.— Изд. 2-е, перераб. и доп.— М., Энергия, 1975.— 528 с.
4. Khan, F. LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance.— Cambridge Univ. Press, 2009.

Рецензент: доктор техн. наук, ст. наук. співробітник М. П. Трембовецький, Державний університет телекомунікацій, Київ.

С. В. Козелков, Н. В. Коршун

МЕТОД АДАПТИВНОЇ ДЕМОДУЛЯЦІЇ РАДІОСИГНАЛІВ МІЛЛИМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНА

Рассмотрены возможности совершенствования помехоустойчивости демодуляции сигнала миллиметрового диапазона волн при наличии частотно-селективных замираний.

Ключевые слова: крайне высокочастотный радиосигнал; автокорреляционный прием; оптимальный когерентный прием; частотно-селективные замирания.

S. V. Kozelkov, N. V. Korshun

METHOD OF ADAPTIVE DEMODULATION OF MILLIMETER WAVE RADIO SIGNALS

The article considers the possibilities of improving noise immunity of millimeter wave signal demodulation in the presence of frequency selective fading.

Keywords: extremely high-frequency radio signal; autocorrelation reception; optimal coherent reception; frequency-selective fading.

УДК 621.5

Ю. В. МЕЛЬНИК, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник;

Є. В. ГАВРИЛКО, доктор техн. наук, ст. наук. співробітник,

Державний університет телекомунікацій, Київ

ЛЮДИНА-ОПЕРАТОР У СТРУКТУРІ УПРАВЛІННЯ ТМН МЕРЕЖІ

Визначено роль оператора в структурі управління телекомунікаційною мережею та розроблено уточнювальну структурну схему ергатичної системи для врахування функціонального стану людини-оператора.

Ключові слова: модель управління; людина-оператор; функціональний стан; ергатична система.

Вступ

Будь-яка телекомунікаційна мережа (ТКМ) містить у собі абонентське обладнання, за допомогою якого людина має можливість користуватися телекомунікаційними послугами. Через таке обладнання людина формує управляючі впливи на ТКМ, задовольняючи свої потреби в інформації.

© Ю. В. Мельник, Є. В. Гаврилко, 2017