УДК 621.391

Р.М. Животовський

Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки ЗС України, Київ

УДОСКОНАЛЕНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТРОПОСФЕРНОГО РАДІОХВИЛЬОВОДУ

У статті розроблено удосконалену математичну модель тропосферного радіохвильоводу у вигляді багатоканального параметричного фільтру. Зазначена модель дозволяє поєднати характеристики радіохвильоводу з параметрами фільтру та оцінити їх кількісні значення.

Ключові слова: *радіолокаційні станції, тропосферний хвильовод, адитивні завади, завадозахищеність.*

Вступ

На сьогоднішній день більшість моделей радіолокаційного тропосферного радіохвильоводу описує процес перетворення характеристик сигналів в цьому каналі на шляху від передавача до цілі та у напрямку від цілі до пристрою обробки радіолокаційної станції (РЛС). При формуванні його математичних моделей звичайно виходять з наступних, досить узагальнених припущень [1 – 3]:

1. Канал складається з послідовності елементів, в першому наближенні вважається, що зворотні зв'язки між його елементами відсутні.

2. Для опису властивостей перетворення використовують феноменологічний принцип, у відповідності до якого кожний елемент каналу є деяким багатополюсником з відомим зв'язком входу та виходу. Число входів та виходів багатополюсника відповідає розмірності вхідних та вихідних векторних сигналів.

3. Кожному елементу каналу у вигляді багатополюсника співставляється деякий оператор (стохастичний або детермінований), конкретний вигляд якого визначається на підставі фізичних особливостей даного елементу.

Тому **метою статті** є розробка удосконаленої математичної моделі тропосферного радіохвильоводу для підвищення точності та спрощення проведення розрахунків параметрів тропосферного радіохвильоводу.

Виклад основного матеріалу дослідження

Взаємодію різних елементів РЛС може бути описано за допомогою ряду операторів та векторів.

Нехай $\bar{A}_t$ – оператор передавального тракту РЛС, що описує перетворення зондуючого сигналу $\bar{a}_1(t)$ у випромінюєму електромагнітну хвилю з заданою просторово-часовою та поляризаційною структурою; $\bar{A}_r$ – оператор, що характеризує властивості приймального тракту; $\bar{F}_s$ та $\bar{F}_п$ – мультиплікативні оператори перетворення сигналів (завад) на трасах «передавач - ціль» та «передавач - джерело пасивної завади» відповідно; $\bar{T}_s$ та $\bar{T}_п$ – аналогічні оператори перетворення на трасах «ціль - приймач» та «джерело пасивних завад - приймач» відповідно; $\bar{S}$ – оператор цілі; $\overline{N_П}$, $\overline{M_П}$ – вектори активних та пасивних завад, що адитивно входять в приймаємо суміш сигналу. Тоді сигнал $\bar{a}_2(t)$ на виході приймального тракту РЛС має вигляд:

$$\vec{a}_2(t) = \vec{A}_r[(\vec{T}_s\vec{S}\vec{F}_s + \vec{T}_п\vec{M}_п\vec{F}_п)\vec{A}_t\vec{a}_1(t) + \vec{N}_п]. \quad (1)$$

Прийнято вважати, що рівняння виду (1) є основою для постановки задачі по оптимізації РЛС. Важливо, що змінювати можливо вид радіолокаційного сигналу $\bar{a}_1(t)$, а також оператори передавального та приймального трактів РЛС. При цьому апріорна інформація про цілі (оператор $\bar{S}$) та завади (оператори $\overline{M_П}$ та $\overline{N_П}$) визначають вибір конкретного виду радіолокаційного сигналу $\bar{a}_1(t)$ та операторів передавального та приймального трактів РЛС. Оператор цілі $\bar{S}$ відображає простір параметрів падаючої на ціль хвилі в простір параметрів відбитої хвилі.

Припустимо, що ціль точечна. Тоді у відповідності з (1) оптимізація будь-якої РЛС може проводитися двома способами. Якщо параметри випромінюючого сигналу фіксовані, оптимізація відбувається по обраному критерію тільки в приймальному тракті, характеристики якого обираються у відповідності до $\bar{T}_s$ та $\bar{F}_s$. Другий шлях оптимізації РЛС має на увазі вибір способу обробки, так і параметрів зондуючого сигналу у відповідності $\bar{T}_s$ та $\bar{F}_s$ [1, 4].

Кожному з вказаних підходів властиві певні переваги та недоліки. Перший підхід є найбільш прийнятним, коли відсутні апріорні відомості про цілі та середовище поширення радіохвиль. Його перевагою є також простота формулювання задачі та отриманих результатів. Недоліком такого підходу є проблематичність здійснення правильного вибору критерію оптимальності, що має сенс для широкого класу багатоцільових задач.

Другий підхід більш жорсткий, проте його послідовне виконання потребує апріорних даних про середовище розповсюдження радіохвиль та про цілі.

© Р.М. Животовський

Він має велике значення для визначення меж підвищення якості багатоцільових систем [2, 5].

Проаналізуємо характеристики радіолокаційного тропосферного хвильоводу, які можливо використовувати в якості апріорної інформації задач оптимізації. Як відомо, при певних допущеннях процес поширення електромагнітних хвиль в радіолокаційному каналі можна розглядати як лінійну параметричну фільтрацію сигналу [6]. В цьому випадку відбитий сигнал може розглядатися як результат перетворення зондуючого сигналу лінійною системою (фільтром), заданою імпульсною $\dot{h}(t)$ та передаточною характеристикою $\dot{K}(2\pi f)$ модулюючої завади.

Тоді модель радіолокаційного каналу можливо представити спрощеною блок-схемою, наведеною на рис. 1

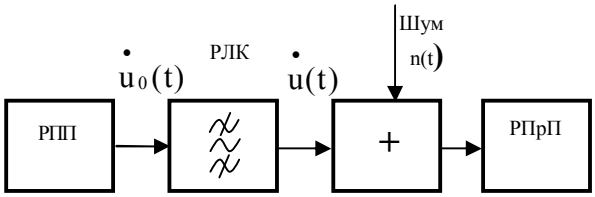

Рис. 1. Блок-схема радіолокаційного каналу

Якщо $\dot{u}_0(t)$ та $\dot{u}(t)$ – зондуючий та відбитий сигнали відповідно, а $\dot{G}_0(2\pi f)$ та $\dot{G}(2\pi f)$ їх спектри, то відгук фільтру, еквівалентного РЛК, на вхід якого подається зонуючий сигнал $\dot{u}_0(t)$, визначається інтегралом Дюамеля

$$\dot{u}(t) = \int_0^{\infty} \dot{h}(t-\tau)\dot{u}_0(\tau)d\tau = \int_0^{\infty} \dot{h}(t)\dot{u}_0(t-\tau)d\tau , \qquad (2)$$

або в частотному представленні записується у вигляді

$$\dot{u}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{G}_0(2\pi f)\dot{K}(2\pi f)e^{j2\pi f t}df , \qquad (3)$$

де $\dot{K}(2\pi f)$ – передаточна функція лінійного фільтра, еквівалентного каналу.

У відповідності з (2) та (3) якщо $\dot{K}(2\pi f)$ відомо, то можлива оптимізація параметрів зондуючого сигналу. Один з подобних способів достатньо ретельно проаналізований в [5, 6], де показано, що, отримуючи імпульсну характеристику h(t) тропосферного радіохвильоводу та вводячи її з урахуванням попередні спотворень в зонуючий сигнал, можна досить ефективно виділяти ціль на фоні інтенсивних модулюючих або пасивних завад. Такий метод зондування простору є інверсним зондуванням. Інший спосіб полягає у узгодженні спектральної структури зондуючого сигналу з передаточною функцією $\dot{K}(2\pi f)$ тропосферного радіохвильоводу. Третій спосіб є комбінацією перших двох. Обмежено коло вирішуємої задачі розглядом можливості узгодження спектральної структури зондуючого сигналу з $\dot{K}(2\pi f)$. При цьому будемо прагнути до того, щоб викривлення структури спектру відбитого від цілі сигналу по відношенню до зондуючого були мінімальним. Останнє еквівалентно зниженню модулюючих завад на входе РпрП.

Таким чином, для висування вимог до виду та параметрів зондуючого сигналу необхідно проаналізувати особливості розглянутих характеристик тропосферного радіохвильоводу в реальній завадовій обстановці.

Експериментальні дослідження підтверджують багатопроменеву особливість проходження радіохвиль сантиметрового та дециметрового діапазонів в тропосферному радіохвильоводі. В рамках даного наближення прийнято вважати, що повне відбите поле складається з полів окремих локальних променів [4 – 6]. В цьому випадку імпульсна характеристика h(t) хвильоводу в найпростішому випадку може бути записана

$$\dot{h}(t) = \frac{1}{A}\sum_{\ell=1}^{\Lambda} \dot{a}_\ell\, \delta(t - t_{з\ell}) , \qquad (4)$$

де a_l – амплітуда сигналі n-го променя;

$A = \sqrt{\sum_{\ell=1}^{\Lambda} \left|\dot{a}_\ell\right|^2}$ – нормуючий по потужності множник; $t_{зl}$ – час затримки сигналу l-го променя.

Передаточна функція хвильоводу-фільтру у відповідності до (4) має вид:

$$\dot{K}(2\pi f) = \frac{1}{A}\sum_{\ell=1}^{\Lambda} \dot{a}_n\, e^{-j2\pi f t_{з\ell}} . \qquad (5)$$

Структурна схема фільтра, що еквівалентний тропосферному раідохвильоводу, з імпульсною характеристикою (5) приведена на рис. 2. Схема включає в себе багатовідвідну лінію затримки (БЛЗ), число відводів L якої рівна числу променів в тропосферному радіохвильоводі. Час затримки сигналу в кожному стволі, в загальному випадку, величина випадкова та визначається часом $t_{зl}$. В кожному відводі є фазообертач (ФО) та ваговий підсилювач (ВП), коефіцієнт підсилення якого залежить від амплітуди сигналу променю. Сигнали усіх променів a_l складаються в лінійному суматорі, який служить еквівалентом простору поширення сигналу.

Вихідний сигнал суматора $\dot{u}(t)$ представляє собою відбитий від точечної цілі корисний сигнал на входе РПрП РЛС в тропосферному радіохвильоводі.

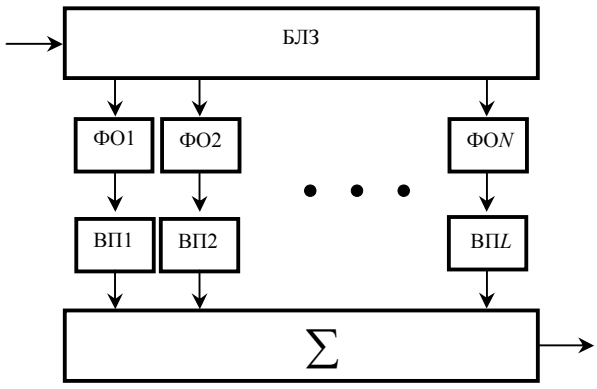

Рис. 2. Еквівалентна структурна схема багатопроменевого тропосферного радіохвильоводу

Проведемо аналіз динаміки кореляційних властивостей тропосферного радіохвильоводу.

В подальшому, задаючи імпульсну характеристику тропосферного радіохвильоводу будемо аналізувати закономірності флуктуації його частотних характеристик.

В цілому аналіз, що проведений в роботі [4 – 5] показує, що при незмінному часі розсіювання каналу ($\Delta t_{зmax} = const$) частота слідування резонансних частот її амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) залишається постійною, та змінюється лише їх амплітуди a_l. Зазначена закономірність має місце для довільного числа променів.

Таким образом, АЧХ багатопроменевих каналів має нерівномірний амплітудний характер та, в загальному випадку, квазіперіодичність слідування резонансних частот. Для кожного каналу його імпульсні та амплітудно-частотні характеристики індивідуальні. При зміні параметрів тропосфери характеристики каналу змінюються випадковим чином. Останній факт дозволяє розглядати імпульсну характеристику як деякий імпульсний випадковий процес.

У відповідності з (5) імпульсна характеристика випадкового багатопроменевого тропосферного радіохвильоводу в рамках розглядаємої моделі представляє собою послідовність δ-імпульсів з випадковими амплітудами a_l та часовим положенням $t_{зl}$. Таким послідовностям можна поставити у відповідність послідовність багатомірних випадкових величин, а початку кожного імпульсу приписувати випадкові значення його параметрів. Подібного роду випадкові імпульсні процеси детально розглянуті в [4 – 6] лише на безкінечних часових інтервалах.

Розглянемо імпульсні характеристики як реалізації деякого випадкового імпульсного процесу, для якого на часовому інтервалі $\left(-T_p/2,\ T_p/2\right)$ з'являється точно (2L+1) імпульсів (число імпульсів співпадає з числом дозволених променів). Нехай T – середній часовий інтервал між променями, що визначається розрізняючою здатністю по дальності. Імпульси розглядаємого випадкового процесу розміщені по обидві сторони від нульового, з яким пов'язано початок відліку часу, та нумеруються в порядку їх слідування на осі часу. Функція $\dot{K}_M^{(k)}(2\pi f)$ – це спектральна щільність для функції $h^{(k)}(t)$, що описує довільну k-тую реалізацію розглядаємого випадкового процесу. Енергетичний спектр $F_h(2\pi f)$ знаходиться з співвідношення:

$$F_h(2\pi f) = \lim_{M\to\infty} \frac{2}{(2M+1)T} m_1\left\{\left|\dot{K}_M^{(k)}(2\pi f)\right|^2\right\}, \quad (6)$$

де $m_1\{\ldots\}$ – математичне сподівання.

Як показано в [4], з урахуванням (5), співвідношення (6) можна записати у вигляді:

$$F_h(2\pi f) = \lim_{M\to\infty} \frac{2}{(2M+1)T}\left\{\sum_{\ell=-M}^{M} m_1\left\{\left[a_\ell^{(k)}\right]^2\right\} + \right.$$
$$\left. + \sum_{\ell=-M}^{M}\sum_{\substack{i=-M\\ \ell\neq i}}^{M} m_1\left\{a_\ell^{(k)} a_i^{(k)} e^{-j2\pi f(t_\ell^{(k)}-t_i^{(k)})}\right\}\right\}. \quad (7)$$

Формула (7) дає загальне представлення про енергетичний спектр випадкових послідовностей типу (5). Для розглядаємої моделі багатопроменевих каналів можна припустити, що амплітуди та моменти виникнення імпульсів взаємно незалежні та між однорідними параметрами у різних імпульсів кореляція відсутня. Нехай $\overline{a_l}$ та σ_l^2 – середнє значення та дисперсія випадкової амплітуди l-го імпульсу. Якщо позначити $m_1\left\{e^{-j2\pi f(t_\ell^{(k)}-t_i^{(k)})}\right\} = \dot{H}_p(2\pi f)$, то вираз (7) перепишемо до вигляду:

$$F_h(2\pi f) = \lim_{L\to\infty} \frac{2}{(2L+1)T}\left\{\sum_{\ell=-L}^{L} (\overline{a}_\ell^2 + \sigma_\ell^2) + \right.$$
$$\left. + 2\sum_{\substack{p=1\\ \ell+p\le M}}^{2L}\sum_{\ell=-M}^{L} \overline{a}_\ell \overline{a}_{\ell+p}\, \mathrm{Re}\,\dot{H}_p(2\pi f)\right\}. \quad (8)$$

Для багатопроменевого каналу характерно, що сигнал кожного променю знаходиться на своєму інтервалі рішення кінцевої тривалості. Це дозволяє розглядати змінну по часу та в просторі канал як лінійну параметричне коло, а його імпульсну характеристику як випадковий імпульсний процес з детермінованим тактовим інтервалом [5].

В імпульсних випадкових процесах з детермінованим тактовим інтервалом момент появи $t_\ell^{(k)}$ будь-якого l-го імпульсі реалізації процесу може бути представлений у вигляді $t_\ell^{(k)} = \ell T + \nu_\ell^{(k)}$, де T в даному випадку є довжиною тактового інтервалу; ν_l – випад-

кова величина з нульовим середнім. Величина ν_l по абсолютному значенню не перевищує значення $T/2$, так як за один такт виникає тільки один імпульс.

Нехай $\dot{\theta}_{\ell\nu}(2\pi f)$ – одномірна характеристична функція випадкової величини ν_l. Тоді, у відповідності до допущення про незалежність однойменних параметрів різних імпульсів, функція $\dot{H}_p(2\pi f)$ має вид

$$\dot{H}_p(2\pi f) = e^{-j2\pi fT} m_l \left\{ e^{-j2\pi f\left[\nu_\ell^{(k)} - \nu_i^{(k)}\right]} \right\} =$$

$$= \left| \dot{\theta}_{l\nu}(2\pi f) \right|^2 e^{-jp2\pi fT}.$$

Співвідношення (8) перепишеться до вигляду

$$F_h(2\pi f) = \lim_{L\to\infty} \frac{2}{(2L+1)T} \left\{ \sum_{\ell=-L}^{L} (\bar{a}_\ell^2 + \sigma_\ell^2) + \right.$$

$$\left. + 2\sum_{p=1}^{2L} \sum_{\substack{\ell=-L \\ \ell+p\le L}}^{L} \bar{a}_\ell \bar{a}_{\ell+p} \left| \dot{\theta}_{\ell\nu}(2\pi f) \right|^2 \cos(p2\pi fT) \right\}. \quad (9)$$

Аналіз виразу (9) показує, що енергетичний спектр різноманітного випадкового імпульсного процесу залежить від середніх значень $\overline{a_l}$ та дисперсій σ_l^2. Функції $\dot{\theta}_{l\nu}(2\pi f)$ та $\cos(p2\pi fT)$ залежать від частоти та визначають нерівномірність амплітудної структури енергетичного спектру $F_h(2\pi f)$. Якщо вважати випадкову величину ν_l, розподіленою рівномірні на часовому інтервалі $(-x; x)$, то функція $\dot{\theta}_{l\nu}(2\pi f)$ має вид $\frac{\sin(2\pi fx)}{2\pi fx}$.

Отримані висновки можуть бути розповсюдженні і на багатопроменеві канали з розсіюванням в просторі та по частоті.

Висновки

1. В статті розроблена розроблено удосконалену математичну модель тропосферного радіохвильоводу у вигляді багатоканального параметричного фільтру. Відмінність розробленої моделі від відомих полягає в тому, що вона встановлює нові аналітичні залежності викривлень сигналу у тропосферному радіохвильоводі та дозволяє поєднати характеристики радіохвильоводу з параметрами фільтру та оцінити їх кількісні значення.

2. Розроблена модель дозволяє: провести кількісну оцінку негативного впливу даних видів завад на якість оцінювання параметрів цілей; отримати математичні співвідношення при дії завад на РЛС; визначити заходи, спрямовані на боротьбу з навмисними завадами; проводити аналітичне моделювання тропосферному радіохвильоводу в умовах дії завад.

Напрямком подальших досліджень є розробка методики управління параметрами тропосферного радіохвильоводу перспективних РЛС.

Список літератури

1. *Вакман Д.Е. Вопросы синтеза радиолокационных сигналов / Д.Е. Вакман, Р.М. Седлецкий. – М.: Сов. радио, 1973. – 312 с.*
2. *Бреховский Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховский. – М.: Наука, 1978. – 348 с.*
3. *Кравцов Ю.А. Геометрическая оптика неоднородных сред / Ю.А. Кравцов, Ю.И. Орлов. – М.: Наука, 1980. – 304 с.*
4. *Леонов І.Г. Модель дискретного радіолокаційного каналу з розсіюванням за часом і частотою / І.Г. Леонов, А.М. Коржов, Р.М. Животовський, А.О. Радюков // Збірник наукових праць ЦНДІ ОВТ ЗС України. – К.: ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2014. – Вип. 1(52). – С. 196-205.*
5. *Василенко Г.И. Теория восстановления сигналов: О редукции к идеальному прибору в физике и технике / Г.И. Василенко. – М.: Сов. радио, 1979. – 272 с.*
6. *Фалькович С.Е. Оптимальный прием пространственно-временных сигналов в радиоканалах с рассеянием / С.Е. Фалькович, В.И. Пономарев, Ю.В. Шкварко; Под ред. С.Е. Фальковича. – М.: Радио и связь, 1989. – 296 с.*

Надійшла до редколегії 23.05.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.В. Кувшинов, Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації, Київ.

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРОПОСФЕРНОГО РАДИОВОЛНОВОДА

Р.Н. Животовский

В статье разработана усовершенствованная математическая модель тропосферного радиоволновода в виде многоканального параметрического фильтра. Представленная модель позволяет синтезировать характеристики радиоволновода с параметрами фильтра и оценить их количественные значения.

Ключевые слова: *радиолокационные станции, тропосферный радиоволновод, аддитивные помехи, помехозащищенность.*

IMPROVED MATHEMATICAL MODEL OF TROPOSPHERIC RADIOWAVEEXPLORER

R.N. Zhivotovsky

In article developed improved mathematical model of tropospheric radiowaveexplorer in view of multi-channel parametric filter. Specified model allows to combine features radiowaveexplorer with the parameters filter and assess their quantitative values.

Keywords: *radiolocation station, tropospheric radiowaveexplorer, additive noise, noise immunity.*