

Возможности пассивного синтезирования апертуры антенн космической системы

П.О. Шумский¹, А.А. Мещеряков², Г.С. Шарыгин³

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, Томск, Проспект Ленина, 40

¹shumskii@gmail.com; ²msch@ms.tusur.ru; ³gssh@mail.tomsknet.ru

В статье обсуждается возможность пассивного синтезирования апертуры антенн спутниковых систем мониторинга наземных источников радиоизлучения. Приведены экспериментальные данные инверсного пассивного синтезирования на трассах «космос-земля» при приеме излучений спутников GPS. Данные подтверждают возможность создания пассивного SAR и фазовой интерференционной обработки сигналов.

Possibility of passive synthesis of the satellite system antenna aperture for ground-based sources of illumination monitoring is discussed in the paper. There are given experimental data got by GPS, concerning inverse passive synthesis along the path Space-Earth. The data prove the possibility to build a passive SAR and the phase interference signal processing.

Введение

Принципы синтезирования апертуры антенн в радиолокации широко известны. Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) воздушного и космического базирования разрабатываются и применяются для дистанционного зондирования земной поверхности с высокой разрешающей способностью, достигающей до единиц метров.

Для решения задач мониторинга радиотехнической обстановки, обнаружения и определения координат источников излучения значительный интерес представляет определение возможности и путей построения РСА, работающих в пассивном режиме.

Главным препятствием при создании пассивных РСА является требование сохранения высокой когерентности принимаемого сигнала в течение времени синтезирования T_c . Фазовые шумы и нестабильность частоты источников излучения приводят к тому, что поле в синтезированной раскрыве приемной антенны приобретает случайные изменения, искажающие синтезированную диаграмму.

Источники ошибок пассивного SAR

Мгновенное значение напряженности поля отдельного источника излучения в месте приема может быть представлено в виде

$$u(x, t) = \text{Re} \left[U(x, t) e^{j\varphi(x, t)} e^{j\Delta\omega t} e^{j\omega t} \right], \quad (1)$$

где x - координата точки расположения физической антенны вдоль направления движения; ω - частота излучения источника, φ - изменения фазы, вызванные фазовыми шумами (нестабильностью частоты) источника, $\Delta\omega$ - ошибка измерения частоты, то есть разность истинной частоты и частоты, принятой для анализа, при этом $\Delta\omega$ за время синтезирования может считаться постоянной.

Амплитуда U и фаза φ зависят как от линейной координаты точки наблюдения x , так и от времени t . Полагая, что все пространственные изменения вызваны только временными, и связывая время и координату x с продольной скоростью носителя V , получим

$$u(x) = \text{Re} \left[U(x) e^{j\varphi(x)} e^{j\frac{\Delta\omega}{V}x} e^{j\omega t} \right]. \quad (2)$$

Здесь $U(x)$ и $\varphi(x)$ являются случайными функциями, интервалы корреляции которых Δx_{0U} и $\Delta x_{0\varphi}$ вдоль оси x пропорциональны времени корреляции этих величин с коэффициентом V . Рис. 1 иллюстрирует случайное распределение фазы вдоль раскрыва синтезированной антенны (СА) при расположении источника в поперечном направлении без учета расфокусировки, то есть в случае, когда интервал синтезирования VT_c много меньше длины трассы.

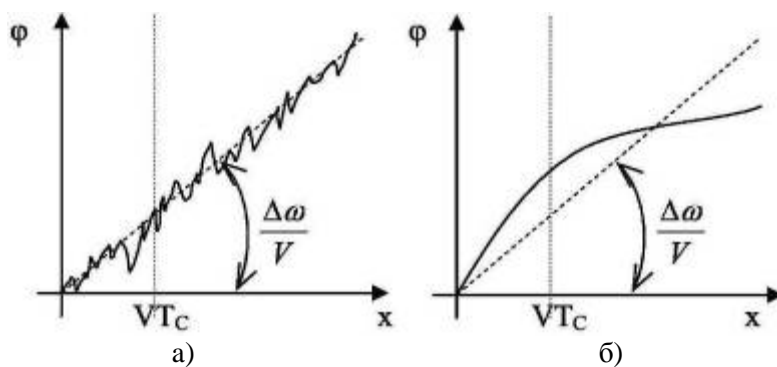


Рис. 1. Распределение фазы в раскрыве антенны пассивного SAR
а) при $\Delta x_{0\varphi} \ll VT_c$, б) при $\Delta x_{0\varphi} \gg VT_c$

Таким образом, можно выделить три источника ошибок пассивных РСА, связанных с неопределенностью параметров источника излучения:

1. Погрешность определения несущей частоты источника излучения, приводящая к наклону синтезированного фазового фронта и, соответственно, к отклонению диаграммы СА и систематической ошибке пеленгования.

2. «Медленные» флуктуации фазы (частоты) источника с временем корреляции, много большим времени синтезирования, также приводящие к отклонению диаграммы СА и ошибке пеленгования, однако эта ошибка является случайной при повторении процесса синтезирования.

3. «Быстрые» флуктуации фазы (частоты) источника с временем корреляции, много меньшим времени синтезирования, приводящие к случайным искажениям и расширению диаграммы СА и, следовательно, к ухудшению разрешающей способности РСА, а также к подъему огибающей боковых лепестков диаграммы. К аналогичному эффекту приводит влияние собственных шумов приемной аппаратуры.

Случайные изменения амплитуды сигнала сказываются только в случае ее быстрых изменений и приводят к тому же эффекту, как и быстрые флуктуации фазы.

Случайные изменения (нестабильность) фазы источника излучения, как правило, имеют широкий спектр и на ограниченных интервалах времени являются нестационарными. Для их описания удобно вместо корреляционных использовать структурные функции:

$$D_{\varphi}(\Delta x) = \left\langle [\varphi(x) - \varphi(x + \Delta x)]^2 \right\rangle, \text{ или} \\
D_{\varphi}(\Delta t) = \left\langle [\varphi(t) - \varphi(t + \Delta t)]^2 \right\rangle, \quad (3)$$

где $\Delta x = V\Delta t$, а знак $\langle \rangle$ означает усреднение по реализациям.

Структурные функции фазы GPS сигналов

Для экспериментального определения структурных функций фазы на трассах «космос-земля» использованы сигналы GPS спутников, находящиеся на орбите

высотой 20189 км. Обработывались файлы данных, полученные с выхода приемника Ashtech Z-12 и содержащие ежесекундные значения полной псевдо-фазы сигнала несущей частоты передатчика космического аппарата. При обработке использовались последовательности длиной 382 секунды. На рис. 2 показаны начальные участки структурных функций, рассчитанных по этим данным после устранения регулярного хода, вызванного движением космического аппарата по орбите или неравенством частот передатчика и опорного генератора приемника.

Эксперименты показывают, что при приеме сигналов, стабильность частоты которых аналогична стабильности передатчиков GPS, время синтезирования пассивного РСА космического базирования должно быть менее одной секунды. При расположении пассивной РСА на космическом аппарате, движущемся со скоростью 7100 м/с (что примерно соответствует высоте орбиты 1500 км), и времени синтезирования 0,5 с интервал синтезирования составит 3550 м, и разрешающая способность по углу в плоскости, поперечной к плоскости орбиты, составит в 10-см диапазоне волн 0,1 угловой минуты. На поверхности Земли это эквивалентно линейному размеру элемента разрешения параллельно линии орбиты 42 метра. Такой результат может быть получен только при приеме непрерывных сигналов или последовательности когерентных импульсов.

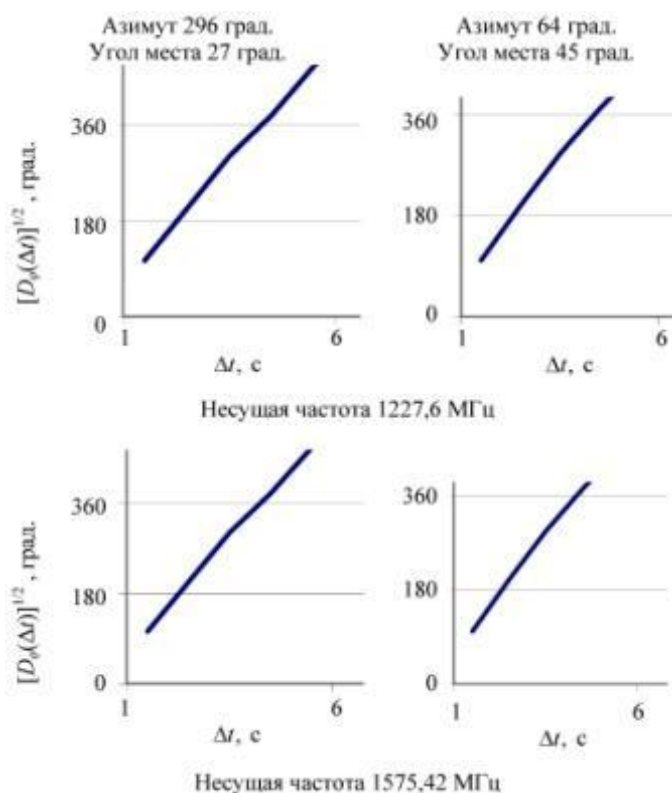


Рис. 2. Структурные функции фазы

Структурные функции разности фаз GPS сигналов при разнесенном приеме

Для увеличения времени синтезирования и при работе по источникам сигналов с меньшей стабильностью в пассивной системе может быть применен интерференционный режим с измерением разности фаз на выходе двух антенн, разнесенных на некоторое расстояние Δx вдоль траектории носителя, движущегося со скоростью V . В этом случае градиент разности фаз δ , пеленг α и дальность L до источника сигнала связаны соотношением

$$\delta = \frac{d\Delta\varphi}{dt} = \frac{2\pi V \Delta x \cos \alpha}{\lambda L}. \quad (4)$$

Ошибка определения градиента разности фаз прямо определяет как точность измерения дистанции, так и разрешающую способность по азимуту. Случайная составляющая ошибки может быть оценена по структурной функции разности фаз

$$D_{\Delta\varphi}(\Delta t) = \left\langle [\Delta\varphi(t) - \Delta\varphi(t + \Delta t)]^2 \right\rangle. \quad (5)$$

На рисунках 3-5 приведены структурные функции разности фаз, рассчитанные по сигналам разных спутников. Используются реализации длиной 1,8 часа. При обработке

был устранен регулярный ход разности фаз, вызванный систематическими вариациями градиента δ . Видно, что время анализа в интерференционной системе может составлять единицы и даже десятки минут.

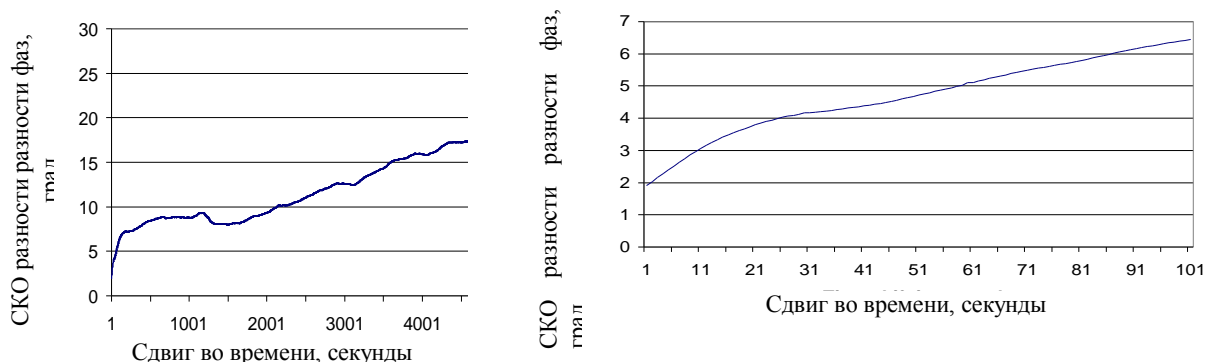


Рис. 3. Структурные функции разности фаз. Угол места 10-46 град

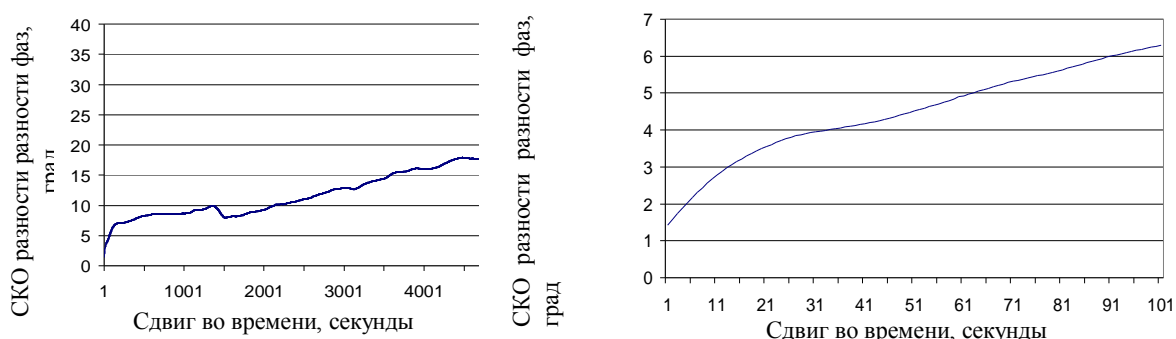


Рис. 4. Структурные функции разности фаз. Угол места 38-53 град

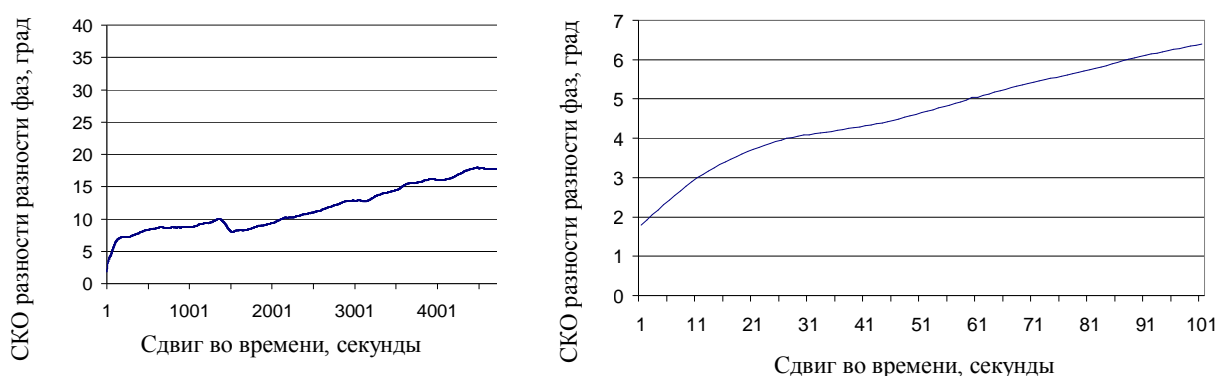


Рис. 5. Структурные функции разности фаз. Угол места 28-78 град

При оценке градиента δ методом наименьших квадратов дисперсия этой оценки равна

$$\sigma_{\delta}^2 = \frac{12\sigma_{\Delta\varphi}^2}{nT^2}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\Delta\varphi}^2$ - дисперсия разности фаз, n - число независимых отсчетов разности фаз, равномерно распределенных в интервале времени анализа сигнала T .

Число n может быть приближенно определено как частное от деления времени анализа T на время корреляции отсчетов разности фаз. Полученные структурные функции показывают, что время накопления данных может составлять, по крайней

мере, 30 минут, а интервал корреляции отсчетов разности фаз равен примерно 15 секундам. Следовательно, n достигает 120 и более.

Из формул (4) и (6) следует, что разрешающая способность по дальности равна

$$\sigma_L = \frac{2\pi V \Delta x \sigma_{\Delta\varphi} \cos \alpha}{\lambda \delta^2 T} \sqrt{\frac{12}{n}}, \quad (7)$$

а разрешающая способность по углу

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_{\Delta\varphi}}{T \sqrt{\left(\frac{2\pi V \Delta x}{\lambda L}\right)^2 - \delta^2}} \sqrt{\frac{12}{n}}. \quad (8)$$

Заключение

Приведенные в докладе материалы показывают возможность пассивного синтезирования антенны спутниковой системы мониторинга наземных источников когерентного излучения и позволяют оценить допустимое время и длину синтезирования. Приведенные данные также показывают возможность построения интерференционной фазовой системы определения местоположения наземных источников когерентного и некогерентного излучения, а также оценить разрешающую способность такой системы по дальности и углу.