

УДК 621.396.96+537.874.4

А.В. КСЕНДЗУК

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

ГРАДИЕНТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ

Разработаны принципы градиентной оптимизации многопозиционных радиолокационных системы с синтезированием апертуры антенны по критериям, связанным с разрешающей способностью, показан пример такой оптимизации для системы дистанционного зондирования, состоящей из четырех носителей.

многопозиционная РСА, навигационные системы, синтез апертуры

Введение

При создании радиотехнических систем дистанционного зондирования аэрокосмического базирования одна из основных и наиболее трудоемких задач – это задача их оптимизации по различным критериям, [1, 2]. Одним из наиболее важных показателей качества функционирования таких систем является пространственная функция неопределенности (ПФН), определяющая не только пространственное разрешение, но и величины динамических и флуктуационных ошибок.

Постановка задачи, ее связь с практическими задачами, цель. Сложность непосредственного анализа функций неопределенности для систем с синтезированием апертуры антенны, вызванная особенностями алгоритмов пространственно-временной обработки [2], не позволяет использовать критерии качества, связанные с ПФН для оптимизации бистатических и многопозиционных РСА. Развитие таких систем положило начало поиску эффективных методов их оптимизации, которые, однако, в большинстве случаев весьма упрощены и не могут быть использованы непосредственно [3].

По этой причине актуальной и важной с практической точки зрения является задача поиска методов оптимизации многопозиционных систем дистанци-

онного зондирования с синтезированием апертуры антенны (МПРСА) с минимальными вычислительными затратами. Именно ее решению и посвящена данная работа.

Синтез алгоритма оптимальной обработки сигналов

В работе [4] были введены понятия полей средних запаздываний $\tau_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)$ и дельта-запаздываний $\tau_\Delta(t, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)$, а также соответствующих им линий равного запаздывания и равного доплеровского сдвига частоты.

Поведение полей и позволяет оценить вид пространственной функции неопределенности $\dot{\Psi}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ для заданного радиолокационного сигнала

$$\dot{S}(t) = \dot{S}_0(t) \exp\{j\omega_0 t\} :$$

$$\dot{\Psi}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \int_0^T \dot{S}_0[t - \tau(t, \mathbf{r}_1)] \dot{S}_0^*[t - \tau(t, \mathbf{r}_2)] \times \exp\{j\omega_0[\tau(t, \mathbf{r}_2) - \tau(t, \mathbf{r}_1)]\} dt. \quad (1)$$

После ряда преобразований несложно получить следующее выражение

$$\dot{\Psi}(\tau, \{a_k\}) = \exp\{j\omega_0 \tau\} \int_{-\tau_0(\mathbf{r}_1)}^{T - \tau_0(\mathbf{r}_1)} \dot{S}_0(t') \dot{S}_0^*(t' - \tau) \times \exp\{j\omega_0 \sum_{k=1..K} a_k [t' + \tau_0(\mathbf{r}_1)]^k\} dt'. \quad (2)$$

Ограничиваясь линейными членами в экспоненте несложно увидеть, что полученное выражение позволяет установить связь между пространственной функцией неопределенности и классической функцией неопределенности радиолокационного сигнала

$$\dot{\Psi}(\tau, \{a_k\}) = C \int_{-\tau_0(\mathbf{r}_1)}^{T-\tau_0(\mathbf{r}_1)} \dot{S}_0(t) \dot{S}_0^*(t-\tau) \exp\{j\Phi t\} dt, \quad (3)$$

где $\tau = \tau_0(\mathbf{r}_2) - \tau_0(\mathbf{r}_1)$, $\Phi = \omega_0[\tau_\Delta(\mathbf{r}_2) - \tau_\Delta(\mathbf{r}_1)]$ – функции, определяющиеся введенными полями средних дальностей и доплеровского сдвига частоты.

При синтезе оптимальных алгоритмов обработки в многопозиционных интерферометрических РСА, оптимальные оценки высоты будем определять из векторно-матричного интегрального уравнения

Обеспечение максимального разрешения в малой окрестности \mathbf{r}_0 или точке пространства \mathbf{r}_0 за счет выполнения условий

$$|\text{grad}_{\mathbf{r}}\{\tau_0(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)\}| \geq P, i=1..Rc, k=1..Tr; \quad (4)$$

$$|\text{grad}_{\mathbf{r}}\{\tau_\Delta(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)\}| \geq P, i=1..Rc, k=1..Tr, \quad (5)$$

которые гарантируют обеспечение разрешения не меньше требуемого вдоль линий $\text{grad}_{\mathbf{r}}\{\tau_0(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)\}$ и $\text{grad}_{\mathbf{r}}\{\tau_\Delta(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)\}$. Условия оптимизации (4), (5) целесообразно применять для обеспечения высокого разрешения для сигналов с плохой разрешающей способностью по времени запаздывания и по сдвигу частоты, соответственно.

Модификацией условий (4), (5) является их выполнение в относительно большой области обзора D_0 (такой, что величина и/или направление градиента существенно изменяются по отношению к произвольной точке $\mathbf{r}_0 \in D_0$). При этом можно использовать как минимальные

$$|\text{grad}_{\mathbf{r}}\{\tau_0(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)\}| \geq P, \mathbf{r}_0 \in D_0, \quad (6)$$

$$|\text{grad}_{\mathbf{r}}\{\tau_\Delta(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)\}| \geq P, \mathbf{r}_0 \in D_0, \quad (7)$$

так и усредненные в пределах следов диаграмм направленности значения, гарантирующие среднее разрешение не хуже заданного:

$$\int_{D_0} |\text{grad}_{\mathbf{r}}\{\tau_0(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)\}| d\mathbf{r}_0 \geq P; \quad (8)$$

$$\int_{D_0} |\text{grad}_{\mathbf{r}}\{\tau_\Delta(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)\}| d\mathbf{r}_0 \geq P. \quad (9)$$

Обеспечение совместного разрешения по градиентам к полям равного запаздывания и равного доплеровского сдвига в области D_0 можно задать с помощью операторов логического умножения

$$|\text{grad}_{\mathbf{r}}\{\tau_0(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)\}| \geq P \& \quad (10)$$

$$\& |\text{grad}_{\mathbf{r}}\{\tau_\Delta(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)\}| \geq P, \mathbf{r}_0 \in D_0,$$

гарантирующих, что по обеим координатам функции неопределенности разрешение не будет хуже заданного.

Угол между линиями градиента важен при обеспечении равномерной области пространственного разрешения. Условия, учитывающие угол между векторами, могут быть представлены в виде зависимости от скалярного произведения векторов (\cdot, \cdot) и их нормы $\|\cdot\|$:

$$\frac{(\text{grad}_{\mathbf{r}}\{\tau_0(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)\}, \text{grad}_{\mathbf{r}}\{\tau_\Delta(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)\})}{\|\text{grad}_{\mathbf{r}}\{\tau_0(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)\}\| \|\text{grad}_{\mathbf{r}}\{\tau_\Delta(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)\}\|} \in P_0.$$

Если критериями оптимизации служат одновременно модули градиентов и величина угла между ними, то необходимо использовать условие

$$\begin{cases} \frac{(\text{grad}_{\mathbf{r}}\{\tau_0(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)\}, \text{grad}_{\mathbf{r}}\{\tau_\Delta(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)\})}{\|\text{grad}_{\mathbf{r}}\{\tau_0(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)\}\| \|\text{grad}_{\mathbf{r}}\{\tau_\Delta(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)\}\|} \in P_0 \\ \|\text{grad}_{\mathbf{r}}\{\tau_0(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)\}\| > P_1 \\ \|\text{grad}_{\mathbf{r}}\{\tau_\Delta(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i)\}\| > P_2 \end{cases}.$$

Пример решения задачи оптимизации выбора области обзора для созвездия излучателей и одного приемника показан ниже. Рассматривается многопозиционная система, которая состоит из одного приемника и четырех передатчиков (из четырех бистатических пар), пространственная конфигурация фиксирована, необходимо в потенциальной зоне наблюдения D (в области пересечения диаграмм направленности передатчиков) выбрать область обзора таким образом, чтобы максимизировать качество построения радиолокационных изображений по критериям, связанным с градиентами к τ_0, τ_Δ .

Пространственная конфигурация МПРСА и потенциальная зона наблюдения показаны на рис. 1; результаты оптимизации – на рис. 2, 3.

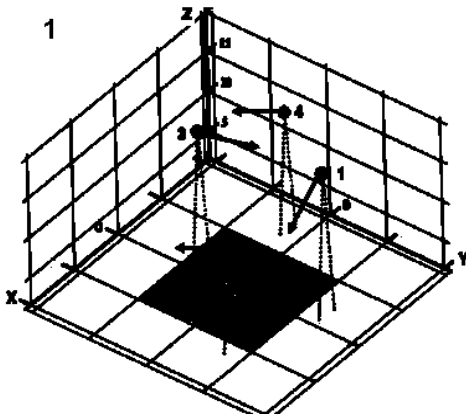


Рис. 1. Пространственная конфигурация МПРСА

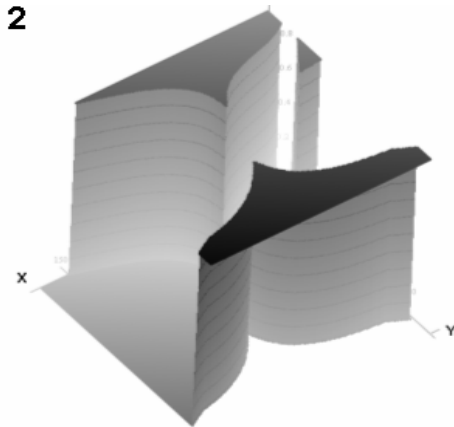


Рис. 2. Результат оптимизации по величине угла между градиентами к полям дельта-запаздываний и постоянных запаздываний

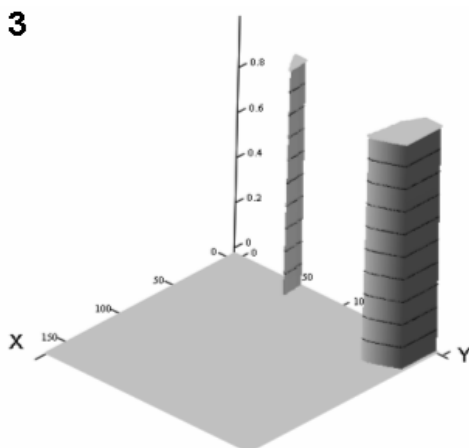


Рис. 3. Результат оптимизации по величине угла между градиентами при учете их модулей

Заключение

Преимущество предложенных методов оптимизации заключается, прежде всего, в небольшом объеме вычислений и, как следствие этого, возможности использования предложенных методов, например, в микроспутниках.

Так, например, для одной точки вычисление градиентов требует 160 умножений и 40 сложений соответственно. В то же время вычисление пространственной функции неопределенности для одной точки требует более 200 умножений и более 100 сложений для каждого отсчета времени, что означает большее число операций приблизительно в $1,5T/t_d$, где T – время синтеза, t_d – время дискретизации.

Для процессора с 4 MFLOPS вычисления для области 1000×1000 точек займут: при вычислении градиентов – 50 сек; при вычислении пространственных функций неопределенности (105 временных дискрет на интервале синтеза апертуры) – 86 дней.

Литература

1. Фалькович С.Е., Хомяков Э.Н. Статистическая теория измерительных радиосистем. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.
2. Ksendzук A.V. Extended quality identifiers for radar measurements // IV International Conference on Antenna Theory and Techniques. – Sevastopol, Ukraine. – 2003. – Vol. 2. – P. 757-760.
3. Krieger G., Fiedler H., Moreira A. Bi- and Multi-Static SAR: Potentials and Challenges // 5-th European Conference on Synthetic Aperture Radar EUSAR 2004. – Ulm, Germany. – 2004. – Vol. 2. – P. 365-371.
4. Ксендзук А.В. Синтез апертуры с использованием навигационной системы ГЛОНАСС // Успехи современной радиоэлектроники. – 2003. – Вып. 2. – С. 44-54.

Поступила 7.03.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.К. Волосюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.