

МИНИМИЗАЦИЯ АППАРАТУРНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ МЕТЕОРНОЙ РЛС

Наиболее эффективным методом определения угловых координат отражающей области метеорного следа является фазовый метод моноимпульсной радиолокации, позволяющий получить высокую точность измерений как угла места, так и азимута, что важно при исследовании пространственных масштабов атмосферных движений. В настоящее время в метеорных РЛС используются двух- и многобазовые фазовые угломерные системы. Их принято характеризовать двумя качественными показателями: величиной нормальной среднеквадратичной ошибки (критерия точности) и вероятностью появления аномальных ошибок (критерий достоверности).

Достоверность результата измерения двухбазовыми угломерами достаточна только при значительном отношении сигнал/шум. Повышение достоверности оценок угловых координат при меньших отношениях сигнал/шум возможно при переходе к многобазовым (трех-, четырех-, пятибазовым) угломерам. Качественные показатели измерения угловых координат отражающей области метеорного следа в значительной степени определяются видом функции неопределенности по угловым координатам $\psi(\nu)$ (пространственной функцией корреляции) системы. Ширина главного лепестка этой функции характеризует точностные возможности системы (чем уже главный лепесток, тем выше точность и разрешающая способность), а уровень боковых лепестков определяет достоверность определения угловых координат.

Задача нахождения оптимальной функции неопределенности по угловым координатам (при заданной погрешности измерения) сводится к отысканию такой антенной системы, которая позволила бы получить минимальный уровень боковых лепестков этой функции в рабочей области направляющих косинусов при ширине главного лепестка, не превышающей максимально допустимой величины. В метеорной радиолокации для определения угловых координат чаще всего применяют антенные системы в виде решеток, элементами которых являются антенны типа волновой канал. Решение задачи отыскания оптимальной функции неопределенности для такого случая может быть выполнено двумя путями:

- изменением амплитудного распределения вдоль раскрыва антенной системы (отказ от равномерного амплитудного распределения и переход к распределению, спадающему по краям);
- изменением расстояния между антеннами, за счет чего устраняется периодичность множителя решетки и уменьшаются дифракционные максимумы высших порядков (использование неэквидистантных антенных решеток).

Первый путь приводит к снижению уровня сигнала в периферийных антеннах, что заведомо ухудшает общую оценку измерения угловых координат, поэтому второй путь является более рациональным.

В первом приближении условие сохранения максимально допустимой ширины главного лепестка функции неопределенности можно обеспечить фиксацией двух элементов решетки на краях раскрыва. Положение внутренних элементов решетки на ширину главного лепестка влияет незначительно. Итак, при известной апертуре решетки X_{\max} необходимо отыскать в пространстве параметров решетки $M(\vec{x})$ положение элементов $\vec{x}_{opt} = (\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \leq x_{\max})$ – вектор координат элементов решетки, при котором выполнялась следующая целевая функция:

$$\min_x \max_{\nu \in U} (\psi(\nu, x)) = \min_x \max_{\nu \in U} (m^{-1} \sum \exp(j2\pi x \nu_i / \lambda));$$

где m – число элементов решетки; λ – длина волны; U – область направляющих косинусов ν , в которой происходит минимизация уровня боковых лепестков.

Величина ν определяется шириной диаграммы направленности передающей антенны метеорной РЛС. Точного аналитического решения поставленной задачи не существует, поэтому на практике при решении подобного рода задач применяют методы, позволяющие получить решение, близкое к оптимальному. К их числу можно отнести метод статистического синтеза неэквидистантных решеток; методы, основанные на применении функциональных операторов; эвристические и градиентные методы.

Отыскание оптимальной функции неопределенности $\psi(v, \bar{x}_{opt})$ численными методами осложняется двумя обстоятельствами. Первое- прямое решение задачи непосредственным полным перебором всех возможных вариантов положения антенн для многобазовых систем требует неоправданно больших затрат машинного времени ,а при большом количестве баз вообще нереально. Второе: целевая функция в зависимости от x является многомодальной, что резко затрудняет отыскание глобального минимума, поэтому отыскание оптимальной оценки целесообразно производить в два этапа. Эти этапы включают в себя отыскание квазиоптимальной оценки, близкой к глобальному минимуму, где в некоторой области устраняется многомодальность целевой функции, и далее в районе квазиоптимальной оценки находится глобальный минимум.

Квазиоптимальную оценку x , лежащую в области глобального минимума, можно получить с помощью метода динамического программирования. Этот метод основан на частичном переборе всех возможных положений элементов решетки, причем алгоритм перебора обеспечивает достаточную степень приближения к оптимальному расположению антенн по раскрыву. Полный перебор возможных вариантов размещения антенн, как уже указывалось, слишком громоздок; при m значениях координат для p -элементной решетки число вариантов составляет $N=m^p$. Например, для $m=100$ и $p=10$, $N=10^{20}$. Просчет такого количества вариантов даже на современных вычислительных машинах практически нереален. Вычислительная процедура по методу динамического программирования строится по следующей схеме. Вместо вычисления функции

$$\min_x \psi(v, x_1, x_2 \dots x_m)$$

находится функция

$$\min_{x_m} \min_{x_{m-1}} \min_x \psi(v, x_1, x_2 \dots x_m).$$

Такая замена незначительно снижает степень приближения к оптимальной оценке, но существенно уменьшает время перебора [1]. Число вариантов перебора сокращается до $(n-1) m^2$.

Для определения глобального минимума целевой функции был применен численный метод деформированного многогранника Нелдера-Мида (симплекс-метод), исходными данными для которого явились квазиоптимальные оценки \bar{x} , найденные методом динамического программирования. Требование непрерывности целевой функции, накладываемое на применимость данного метода выполняется. На рисунке 1 и в таблице 1 представлены результаты оптимизации функции

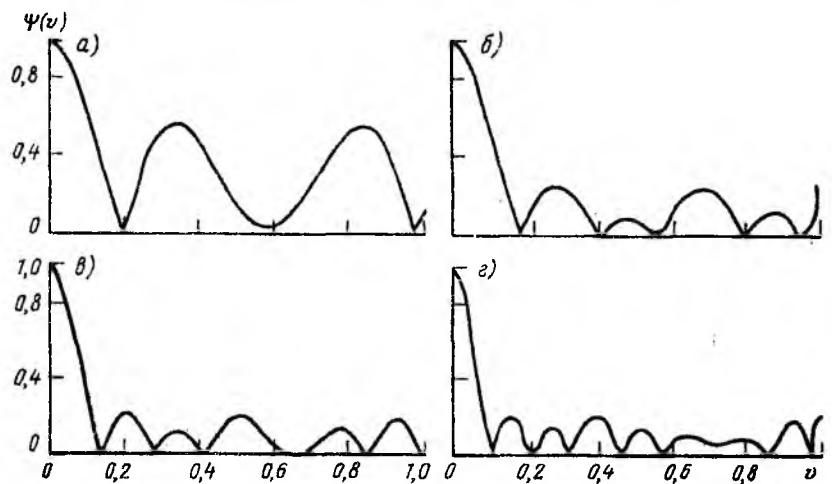


Рис. 1

неопределенности для двух-, трех-, четырех и пятибазовых антенных систем при $v_{\psi}=0.2$.

В табл.1 представлены оптимальные размеры баз многобазовых симметричных антенных систем (в длинах волн) для различных значений полуширины главного лепестка функции неопределенности по угловым координатам Δ . Следует также отметить, что наибольший сравнительный выигрыш при введении дополнительной базы получается при переходе от двух- к трехбазовой системе. При введении четвертой и пятой баз уровни боковых лепестков уменьшаются, но не столь значительно, как при переходе от двух- к трехбазовой системе.

Кроме выбора оптимальных размеров баз возможны и другие направления уменьшения погрешностей определения высоты отражающей области метеорного следа, которые рассмотрим на примере автоматического угломера метеорной РЛС (АУ МРЛС) [2-5].

Устранять появляющуюся многозначность фазовых углов антенной системы возможно проведением дополнительного измерения с помощью антенн, разнесенных на другое базовое расстояние, и комбинированием двух таких измерений в одно однозначное. Для двухбазовой системы наиболее компактным является расположение антенн в виде креста, причем в точке пересечения базовых линий, ориентированных по сторонам света, находится общая антенна для двух баз ($d_1 = \lambda B_1$, $d_2 = \lambda B_2$). При таком расположении разнос отражающих областей на следе для всех антенн угломера минимален, требуются наименьшая антенная площадка и минимальное количество антенн, равное пяти. Допустимая случайная погрешность фазовых сдвигов, при которой отсутствуют ошибки из-за неправильного устранения многозначности, определяется как

$$\sigma_{\Delta\varphi, \text{дон}} \leq \frac{0,0119\pi B_1}{\sqrt{\left(1 - 2r \frac{B_1}{B_2} + \frac{B_1^2}{B_2^2}\right)}} = 0,1335 \frac{\sigma_{\Delta\varphi}}{2\pi}.$$

Отношение сигнал-шум в АУ МРЛС при единичном замере в радиоимпульсе для наихудшего случая, т.е. наиболее неблагоприятного варианта накопления, когда осреднение оценки фазовых сдвигов и дальности получено по пачке из 63-64 радиоимпульсов с постоянной амплитудой, а суммарная погрешность среднего фазового сдвига равна $4^{\circ},30'$ - предельно допустимому значению для АУ с базами $B_1=3,5$ и $B_2=4,5$. Из выражения $\sigma_{\Delta\varphi, \text{дон}}^2 = \sigma_{\text{кв}}^2 + \sigma_{\Delta\varphi, \text{ш}}^2 / N$, где $N=64$; $\sigma_{\Delta\varphi} = 4^{\circ},30'$; $\sigma_{\text{кв}} = 0^{\circ},30'$ (погрешность квантования), можно определить $U_{\text{с.эф}}/\sigma_{\text{ш}}=1,65$ и $2E/N_0=5,5$. В этом предельном случае метод накопления в АУ не сопровождается аномальными ошибками. Аппаратурная погрешность определения высоты отражающей области следа АУ зависит от угла места и для $\sigma_R = 0,2$ км, $\sigma_{\Delta\varphi} = 4^{\circ}30'$, $h = 100$ км приведена в таблице 2. Аппаратурные среднеквадратичные погрешности угловых координат АУ не превышают 17 угловых минут.

Δ	Число баз			
	2	3	4	5
0,08	5,793	3,752	1,494	2,637
	7,713	7,601	5,804	4,316
	—	9,412	7,292	6,340
	—	—	—	9,978
0,1	4,375	3,000	2,212	1,421
	6,115	4,643	5,576	2,813
	—	8,214	7,286	6,114
	—	—	9,153	7,771
	—	—	—	9,287
0,15	2,541	1,597	1,002	1,008
	4,235	3,912	2,471	2,586
	—	5,398	4,313	4,547
	—	—	5,952	6,652
	—	—	—	8,121
0,2	1,671	1,007	4,457	8,185
	3,341	4,316	6,133	6,627
	—	2,584	2,547	4,447
	—	—	1,003	2,710
	—	—	—	1,015

Таблица 2

ε , град	20	25	30	40	50	60	70
σ_h , км	1,3	0,8	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2

За время существования следа (0,05-0,1с) угловые координаты и дальность до области отражения метеорного следа изменяются незначительно, что делает возможным применение метода статистического накопления результатов измерений. Так, если принять мгновенный градиент горизонтального ветра 40 м/с·км, то ошибка в измерении угловых координат при угле места $\varepsilon = 25^{\circ}$ за счет смещения отражающей области в самом неблагоприятном случае не превышает 5-10 угловых минут, а ошибка измерения наклонной дальности составляет 150-300 м. Накопление возможно при измерении наклонной дальности и фазовых сдвигов. При этом погрешность измерений по N импульсам, при условии независимых измерений, уменьшается в \sqrt{N} раз.

Реальная точность АУ МРЛС меньше аппаратурной из-за дополнительных ошибок дальности и угла места, вызванных рефракцией радиоволн в тропосфере и ионосфере. Ошибки, обусловленные тропосферной рефракцией, для углов места, больших 25° , не превышают $\Delta_{\varepsilon, \text{т}} = 1,5$ угл. мин, $\Delta_{R, \text{т}} = 10$ м. Ошибки из-за рефракции радиоволн в Д- и Е-слоях ионосферы для тех же углов места не более $\Delta_{\varepsilon, \text{и}} = 3$ угл. мин, $\Delta_{R, \text{и}} = 150$ м. Ошибки на рефракцию по сути систематические, но из-за невозможности точного учета их зависимости от состояния тропосферы и от электронной концентрации Д- и Е-областей ионосферы приходится рассматривать их как случайные. Ошибки из-за рефракции и вызванные градиентом ветра в метеорной зоне сравнимы с аппаратурными для двухбазового АУ с

базами 3,5λ и 4λ. Для углов места $\varepsilon \in [25^\circ]$ при суммарной погрешности, обусловленной рефракцией и градиентом ветра, равной ~ 6 угл. мин, а суммарной дальности, равной 0,2 км, $\sigma_h \in [1\text{ км}]$. При больших углах места ($\varepsilon \in [35^\circ]$) с учетом всех основных видов погрешностей, которые резко уменьшаются с ростом угла места, возможно определение высоты центра отражающей области следа с $\sigma_h=0,5$ км.

Наряду с наличием систематических погрешностей в реальной фазометрической аппаратуре имеются случайные погрешности измерения, вызываемые дестабилизирующими факторами: изменением температуры и влажности, механическими перемещениями, колебаниями питающей сети и др. Все это приводит к изменению параметров каналов радиоприемных устройств и, соответственно, к появлению дополнительных погрешностей фазовых измерений. Фазовая погрешность, вносимая радиоприемным устройством, может отсутствовать при равенстве фазочастотных характеристик каналов. На практике идентичное схемное и конструктивное исполнение каналов радиоприемных устройств не обеспечивает полной тождественности их фазочастотных характеристик, однако, позволяет снизить на порядок фазовую погрешность радиочастотного тракта относительно погрешности, вносимой отдельным каналом.

Радикальным методом, позволяющим исключить систематические погрешности и погрешности, вызванные влиянием дестабилизирующих факторов, является измерение разности фаз между исследуемыми сигналами с последующей калибровкой радиочастотного тракта. Суть его состоит в том, что исследуемые сигналы, имеющие фазовый сдвиг ϕ , подаются на вход радиочастотного тракта, на выходе которого они будут иметь фазовый сдвиг $\phi_1 = \phi + \Delta\phi$. Результат измерения фиксируется в устройстве первичной обработки сигналов. Если через достаточно малое время, в течение которого значения дестабилизирующих факторов остаются неизменными, подать на вход радиочастотного тракта на той же частоте сигналы с фазовым сдвигом, равным 0, то на его выходе сигналы калибровки будут иметь фазовый сдвиг $\phi_2 = \Delta\phi$, равный по величине сумме систематической погрешности и погрешности, вызванной дестабилизирующими факторами. Истинное значение измеряемого угла может быть определено в устройстве первичной обработки как

$$\phi_1 - \phi_2 = (\phi + \Delta\phi) - \Delta\phi = \phi.$$

Особое место занимают динамические погрешности фазовых измерений, вызванные переходными процессами в избирательных цепях радиочастотного тракта.

Характер процесса установления фазы в многокаскадном резонансном усилителе существенно зависит от частоты входного сигнала. При частоте заполнения радиоимпульса выше резонансной частоты усилителя фаза при переходном процессе увеличивается; в случае, если частота заполнения ниже, то переходной процесс сопровождается уменьшением фазы выходного сигнала. Вариация фазы остается и при точной настройке усилителя, так как в силу различных характеров частотной зависимости емкости и индуктивности колебательного контура абсолютная сопряженная симметрия частотной характеристики усилителя физически невозможна.

Для существенного уменьшения влияния динамической погрешности на результат измерения разности фаз, как и в случае наличия систематической и случайной погрешности, можно воспользоваться методом калибровки. Посылкой этому является тот факт, что нестационарный процесс установления фазы выходного сигнала в многокаскадном резонансном усилителе не зависит от начальной фазы входного сигнала.

Результирующей динамической погрешностью измерения разности фаз является усредненное значение динамической погрешности за время измерения.

Таким образом, динамическая погрешность измерения разности, возникающая в устройстве радиочастотной обработки, полностью определяется вариациями фазы в избирательных цепях его каналов. Уменьшение динамической погрешности измерения разности фаз возможно путем минимизации динамических погрешностей каждого канала, использования метода калибровки каналов, сведения к минимуму временного сдвига сигналов отдельных каналов и выбора времени измерения, обеспечивающего необходимую точность измерений.

В автоматическом угломере применяют несколько видов калибровки. Первый- это калибровка аппаратуры отраженным от следа сигналом. В многоканальном угломере прием каждого второго отраженного импульса сопровождается подключением входов приемников к центральной антенне, относительно которой ведется отсчет фазовых сдвигов в других антеннах. Измеренные фазовые сдвиги в каналах представляют собой аппаратные погрешности, которые вычитаются из фазовых сдвигов, полученных в режиме измерения. Помимо оперативности такая калибровка обладает и другими дос-

тоинствами: используется сигнал в среднем той же амплитуды, что и при измерении, снижаются требования к амплитудно-фазовым характеристикам каналов. Недостаток ее - потеря в среднем половины отраженных импульсов для оценки координат.

Второй вид - калибровка с помощью имитатора метеорных отражений, роль которого выполняет вспомогательный генератор, работающий в импульсном режиме на несущей частоте передатчика. Калибровку осуществляют после регистрации метеорного отражения подачей от имитатора сигналов некоторой средней амплитуды на все приемники через аттенуатор и неотражающий разветвитель. Найденные фазовые сдвиги характеризуют аппаратные погрешности в каналах. В этом случае нет потерь при накоплении отраженных сигналов, но несколько снижается оперативность угломерной МРЛС.

Общим недостатком обоих видов калибровки является отсутствие калибровки антенно-фидерной системы. Третий вид применяется эпизодически. Суть его в использовании фиксированного в пространстве излучателя, координаты которого известны. Таким излучателем может быть передатчик с антенной, установленной в дальней зоне приемных антенн. После регистрации метеорного отражения вычисляются поправки, определив угломером МРЛС угловые координаты излучателя и сравнив их с истинными. В АУ предусмотрена возможность использования второго и третьего видов калибровки.

Калибровка описанных видов позволяет устранить аппаратные погрешности, изменяющиеся во времени. Систематические погрешности, вызванные особенностями приема в конкретных условиях антенного поля со всех направлений, можно выявить с помощью излучателя, установленного на самолете (вертолете, спутнике), координаты которого определяются с высокой точностью. Кроме того, для регламентных проверок, калибровок и снятия амплитудно-фазовых характеристик ЦИФ и усилителей промежуточной частоты приемников в АУ есть имитатор фазовых сдвигов, работающий в импульсном режиме (ИМ ФРС).

К фидерам, соединяющим приемники с антеннами, предъявляют жесткие требования подобия и стабильности вносимых фазовых сдвигов, поскольку антенно-фидерную систему оперативная калибровка не охватывает. Электрическая длина каждого антенного кабеля должна быть кратной π , так как в этом случае фазовый сдвиг, вносимый фидером, не зависит от согласования с нагрузкой (приемником).

Изменение температуры окружающей среды приводит к изменению электрической длины фидера. Поскольку изменение разности фаз производится между соседними антеннами, уход электрических длин фидеров в соседних каналах взаимно компенсируется. Однако экспериментальные исследования показали, что взаимный уход электрических длин фидеров между соседними каналами достигает $3-5^\circ$ (для кабеля длиной $\sim 120\text{м}$) при изменении температуры на $20-25^\circ\text{C}$ (для фидеров, изготовленных из одной партии кабеля РК 75-9-12). Для температурной стабилизации электрических длин фидеров последние заложены в грунт на глубину 1,2 м, где суточная вариация температуры не превышает $0,5 \square 1^\circ\text{C}$. С течением времени происходит старение кабеля, приводящее к изменению его электрической длины (взаимный уход между каналами до $5 \square 7^\circ$ за год), кроме этого межсезонная вариация температуры грунта на глубине закладки фидеров составляет $10 \square 15^\circ\text{C}$ и вызывает взаимный уход электрических длин на $2 \square 3^\circ$. Перечисленные выше факторы приводят к необходимости калибровки системы АУ не менее одного раза в сезон для введения необходимых поправок. Выравнивание электрических длин кабелей выполняется с помощью измерительного фазометра или модифицированного многочастотного метода "короткого замыкания", обеспечивающий погрешность измерения электрической длины менее $0,5 \square$

Список литературы: 1. Зелкин Е.Г., Соколов В.Н. Методы синтеза антенн. М.: Сов. радио, 1980. 294с. 2. Кащеев Б.Л., Жуков В.В. Автоматический угломер. Сообщение 1. Принципы построения // Радиотехника. 1978. Вып. 47. С. 3-9. 3. Жуков В.В., Олейников А.Н., Олейников В.Н., Автоматический угломер. Сообщение 2. Предварительная обработка сигналов // Радиотехника. 1978, Вып. 47. С. 9-14. 4. Олейников А.Н., Олейников В.Н. Жуков В.В., Автоматический угломер. Сообщение 3. Первичная обработка сигналов // Радиотехника. 1979. Вып. 50. С. 72-78. 5. Жуков В.В., Олейников А.Н., Олейников В.Н., Автоматический угломер. Сообщение 4. Математическое обеспечение АУ // Радиотехника. 1979. Вып. 50. С.79-85.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 15.10.2001