

## Расчет квадратурной матрицы рассеяния целей с использованием антенн круговой поляризации при сверхкороткоимпульсном зондировании

А.В. Кочетов

АО «НПП «Радар ммс», Санкт-Петербург, Новосельковская,37, [radar@radar-mms.com](mailto:radar@radar-mms.com).

*Приводится расчет квадратурной матрицы рассеяния цели с использованием квадратурных антенн круговой поляризации при сверхкороткоимпульсном зондировании. Комплект антенн круговой поляризации для измерения параметров поляризационной матрицы рассеяния цели расположены под углом 90° относительно линии визирования РЛС-цель. Приведены экспериментальные данные, что сигналы с выхода антенн круговой поляризации при сверхкороткоимпульсном зондировании находятся в квадратуре*

Поляризационная матрица рассеяния (ПМР) цели описывает характеристики рассеяния цели при воздействии на нее электромагнитной волны с различными видами поляризации на излучение и на прием [1].

Для поляризационного базиса круговых поляризаций электромагнитной волны, падающей на цель, матрица рассеяния цели может быть записана в виде

$$\|S\|_{LR} = \begin{vmatrix} S_{LL}(t) & S_{LR}(t) \\ S_{RL}(t) & S_{RR}(t) \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где:  $S_{LL}(t)$  - отклик цели при ее облучении электромагнитной волной круговой поляризации левого вращения и приеме электромагнитной волны круговой поляризации левого вращения;

$S_{LR}(t)$  - отклик цели при ее облучении электромагнитной волной круговой поляризации левого вращения и приеме электромагнитной волны круговой поляризации правого вращения;

$S_{RL}(t)$  - отклик цели при ее облучении электромагнитной волной круговой поляризации правого вращения и приеме электромагнитной волны круговой поляризации левого вращения;

$S_{RR}(t)$  - отклик цели при ее облучении электромагнитной волной круговой поляризации правого вращения и приеме электромагнитной волны круговой поляризации правого вращения;

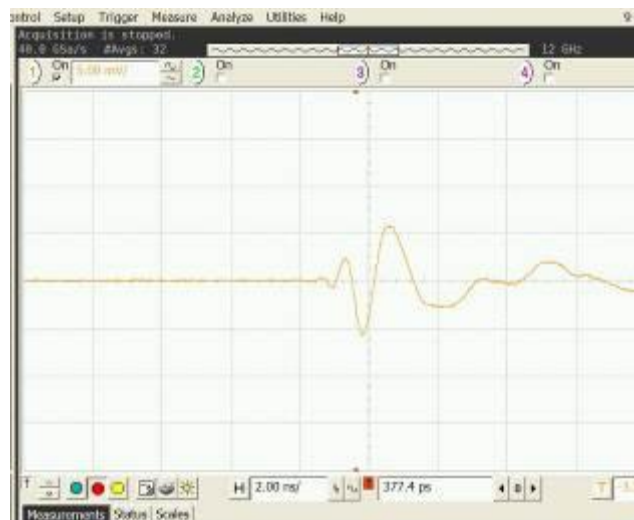
Для монохроматического сигнала, когда функция времени элементов ПМР представляет собой гармонический сигнал, может быть определена амплитуда и абсолютная или относительная фаза элементов ПМР. В этом случае приемник РЛС обеспечивает прием и обработку квадратурных компонент отраженного целью сигнала на заданном виде поляризации излучения и приема с использованием антенн круговой поляризации. Для монохроматического сигнала конструирование антенн круговой поляризации не вызывает трудностей. Такая антенна, как правило, представляет собой два взаимно-ортогональных элементарных излучателя, возбуждаемых со сдвигом по фазе 90° на рабочей частоте антенны. Другой тип антенн для излучения и приема сигналов круговой поляризации это плоские или объемные спиральные антенны [2].

### Возбуждение антенны круговой поляризации сверхкоротким импульсом

Антенна круговой поляризации обладает тем замечательным свойством, что при вращении антенны вокруг продольной оси амплитуда принимаемого/излучаемого сигнала не меняется, а меняется фаза сигнала принимаемого антенной или излучаемого антенной в свободное пространство. Например, при повороте антенны в пространстве

по оси визирования на  $90^\circ$ , фаза сигнала также изменится на  $90^\circ$ . Это свойство антенн круговой поляризации можно использовать при приеме и обработке сигналов при сверхкороткоимпульсном зондировании в СКИ РЛС.

На рис. 1 приведена осциллограмма сигнала, полученного на выходе датчика напряженности электромагнитного поля при возбуждении сверхкоротким импульсом сверхширокополосной плоской спиральной антенны. Как следует из рис. 1, спиральная антенна способна излучать такой импульс электромагнитного поля, при котором сигнал фиксируется при взаимно-ортогональных поляризациях положения датчика напряженности электрического поля.



**а) осциллограмма напряженности электрического поля горизонтальной поляризации**

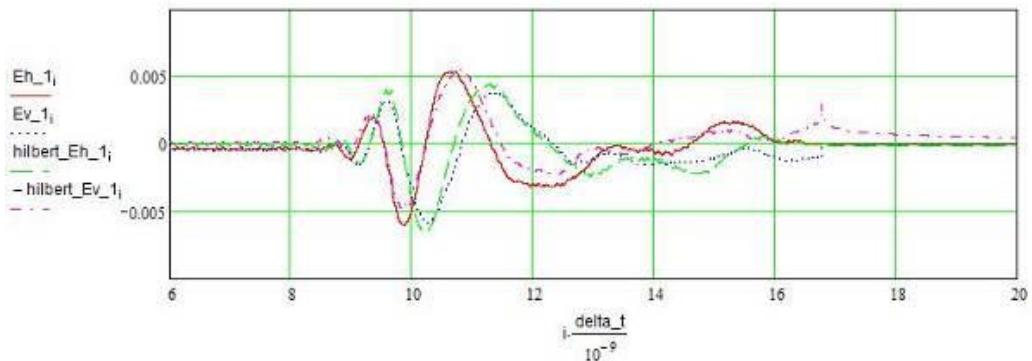


**б) осциллограмма напряженности электрического поля вертикальной поляризации**

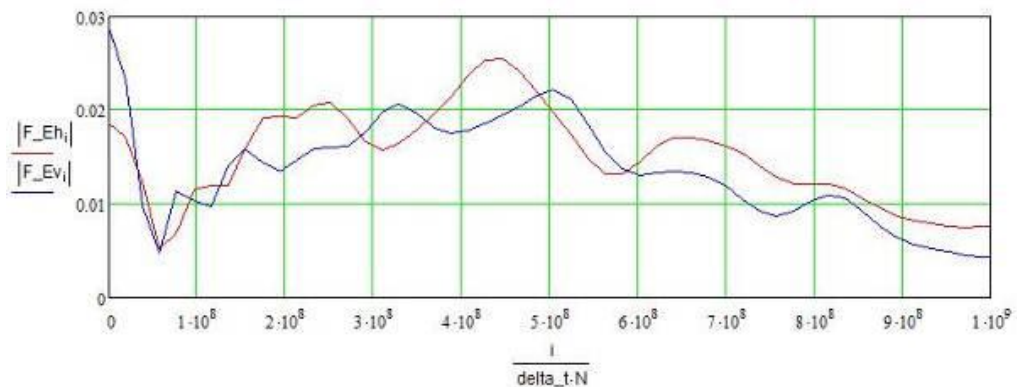
**Рис. 1. Осциллограммы напряженности электрического поля плоской спиральной антенны круговой поляризации левого вращения**

Поскольку начальная синхронизация в этом эксперименте отсутствовала, оценить ортогональность эпюр напряжений на выходе датчика поля можно в среде MathCad по спектральным характеристикам излучаемых сигналов на взаимно-ортогональных поляризациях.

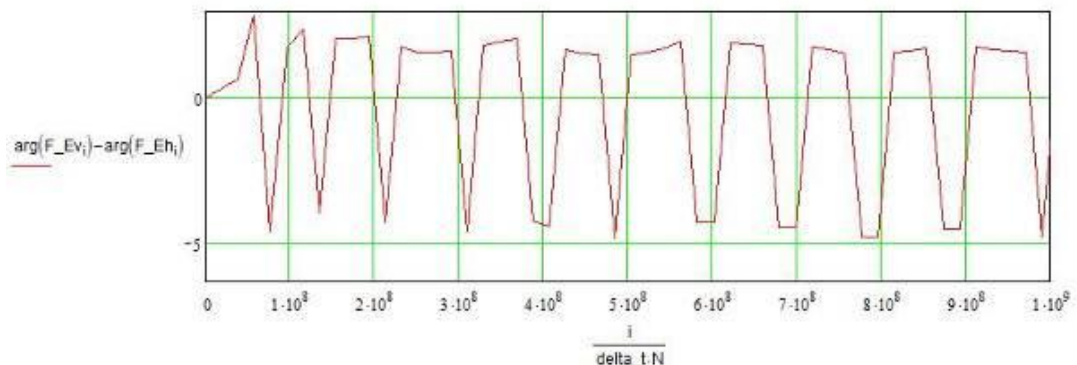
На рис 2. приведены эпюры осциллограмм напряженности электрического поля на взаимно-ортогональных поляризациях и преобразование Гильберта соответствующих компонент сигнала. Временной сдвиг эпюр напряжения на выходе датчика поля при взаимно-ортогональном положении поляризации датчика составил величину 300 пс. После компенсации этой задержки в результатах эксперимента получено хорошее совпадение эпюр осциллограмм на выходе датчика и преобразования Гильберта от соответствующего сигнала. Разность фаз спектральных компонент сигнала, принимаемых датчиком поля на взаимно-ортогональных поляризациях, составила величину  $90 \pm 15^\circ$ .



а) эпюры на выходе датчика напряженности электрического поля, в зависимости от времени (нс)



б) частотный спектр сигналов на выходе датчика напряженности электрического поля (Гц)



в) разность фаз спектральных компонент сигналов на выходе датчика напряженности электрического поля (Гц)

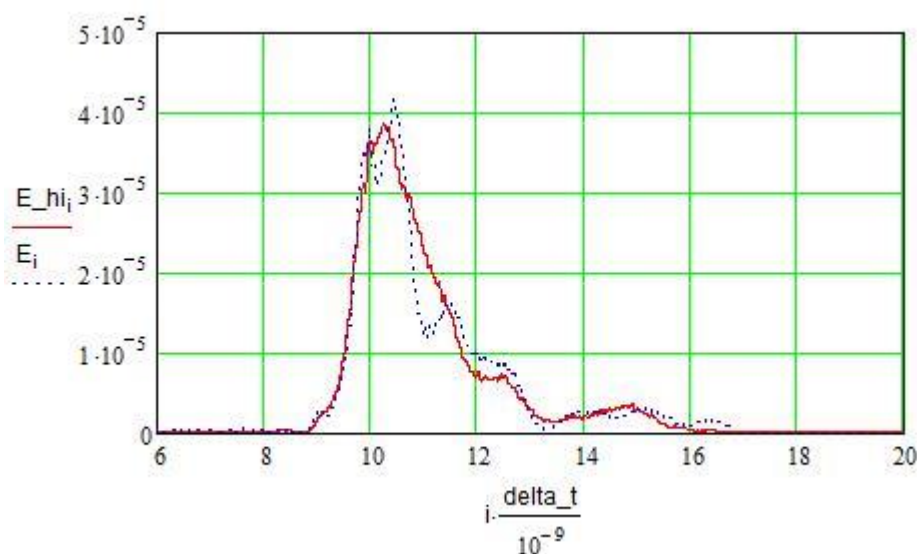
Рис 2. Сигналы импульса электромагнитной волны на выходе датчика напряженности электрического поля плоской спиральной антенны круговой поляризации левого вращения

Таким образом, при развороте передающей антенны круговой поляризации на  $90^\circ$  относительно линии визирования сигналы взаимно-ортогональных компонент напряженности электрического поля электромагнитной волны, возбуждаемой антенной в свободном пространстве, находятся в квадратуре. Огибающая импульса напряженности электрического поля электромагнитной волны может быть непосредственно получена по результатам измерения как:

$$E(t) = \sqrt{[Eh\_1(t)]^2 + [Ev\_1(t)]^2}, \quad (2)$$

где:  $Eh\_1(t)$  и  $Ev\_1(t)$  квадратурные компоненты импульса напряженности электрического поля электромагнитной волны.

Вследствие влияния различных переотражений в процессе проведения измерений, конечной полосы приемного устройства, искажений частотного спектра сигналов взаимно-ортогональных компонент импульса электромагнитной волны и не идеальности квадратуры принятых сигналов, рассчитанная по формуле (2) имеет всплески высокочастотных компонент (рис. 3).



**Рис. 3. Эпюра напряженности электрического поля импульса электромагнитной волны**

С другой стороны, имея квадратурные компоненты сигнала передающей антенны круговой поляризации, можно применить автодинное преобразование для взаимно-ортогональных квадратурных компонент по следующему правилу:

$$\begin{aligned} R(t) &= H[Ev\_1(t)] \cdot Eh\_1(t) - H[Eh\_1(t)] \cdot Ev\_1(t) \\ RI(t) &= -Ev\_1(t) \cdot Eh\_1(t) - H[Ev\_1(t)] \cdot H[Eh\_1(t)], \\ E\_hi(t) &= \sqrt{[R(t)]^2 + [RI(t)]^2} \end{aligned} \quad (3)$$

где:  $R(t)$  - действительная часть автодинного преобразования;

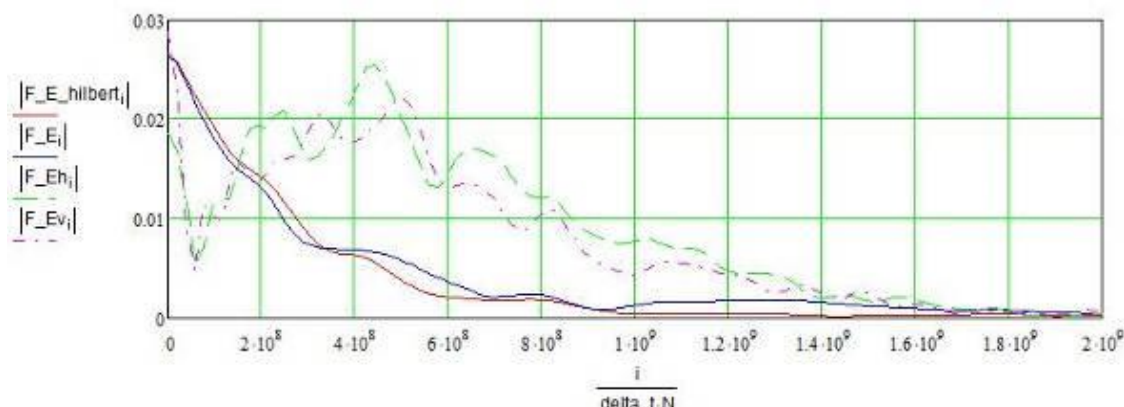
$RI(t)$  - мнимая часть автодинного преобразования;

$H[Ev\_1(t)]$  - преобразование Гильберта сигнала  $Ev\_1(t)$ ;

$H[Eh\_1(t)]$  - преобразование Гильберта сигнала  $Eh\_1(t)$ .

Автодинное преобразование действует как идеальный математический смеситель с фазовым подавлением зеркального канала. В результате на выходе такого смесителя формируется сигнал, форма которого повторяет форму импульса напряженности электрического поля электромагнитной волны, возбуждаемой спиральной антенной

круговой поляризации. Спектр частот импульса располагается в области видеочастот с наличием постоянной составляющей (рис. 4).



**Рис. 4. Спектр частот импульса электромагнитной волны:**

$F_{Ei}, F_{Eh}$  - спектр частот квадратурных компонент

$F_E$  - спектр частот импульса электромагнитной волны по формуле (2)

$F_{E\_hilbert}$  - спектр частот импульса после автодинного преобразования

Как следует из рис. 4, использование автодинного преобразования (3) квадратурных компонент импульса электромагнитной волны устраняет паразитные высокочастотные колебания на эпюре напряженности электрического поля.

#### **Радиолокационное зондирование целей антеннами круговой поляризации**

При радиолокационном зондировании целей сверхкороткоимпульсным сигналом целесообразно использовать круговой поляризационный базис.

С учетом возможностей, которые открывает использование квадратурных компонент отраженного от цели сигнала и их автодинного преобразования, поляризационный базис СКИ РЛС должен предусматривать комбинацию антенн круговой поляризации исходного базиса и базиса, развернутого относительно линии визирования на  $90^\circ$ .

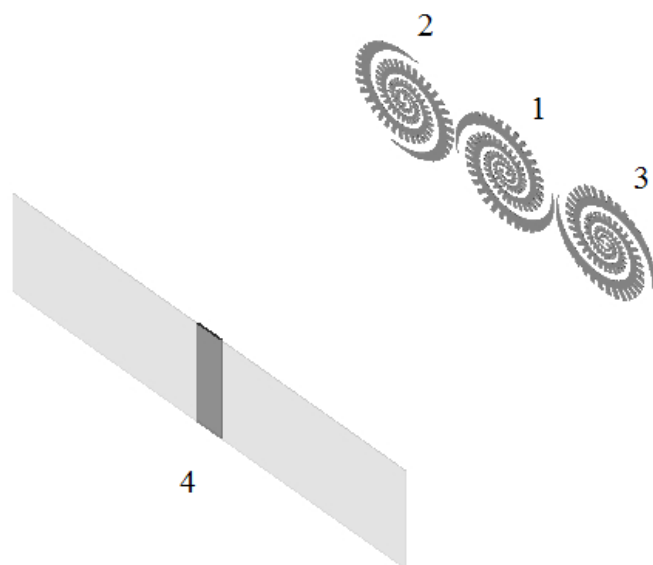
При использовании комбинации антенн круговой поляризации отпадает необходимость применения математического преобразования Гильберта, как дорогой операции в смысле вычислительных ресурсов. Вычисление амплитуды и мощности сигнала ПМР цели производится непосредственно по результатам измерений сигнала квадратур на выходе антенн круговой поляризации.

В среде XFDTD (рис.5) проведено численное электромагнитное моделирование плоских сверхширокополосных антенн круговой поляризации, использованных в натурном эксперименте (рис.1). Комбинация антенн круговой поляризации левого и правого вращения на рис. 5 дает максимальное значение отраженного сигнала при радиолокационном зондировании плоских отражателей, кроме того, приемные антенны 1 и 3 по линии визирования развернуты на  $90^\circ$ .

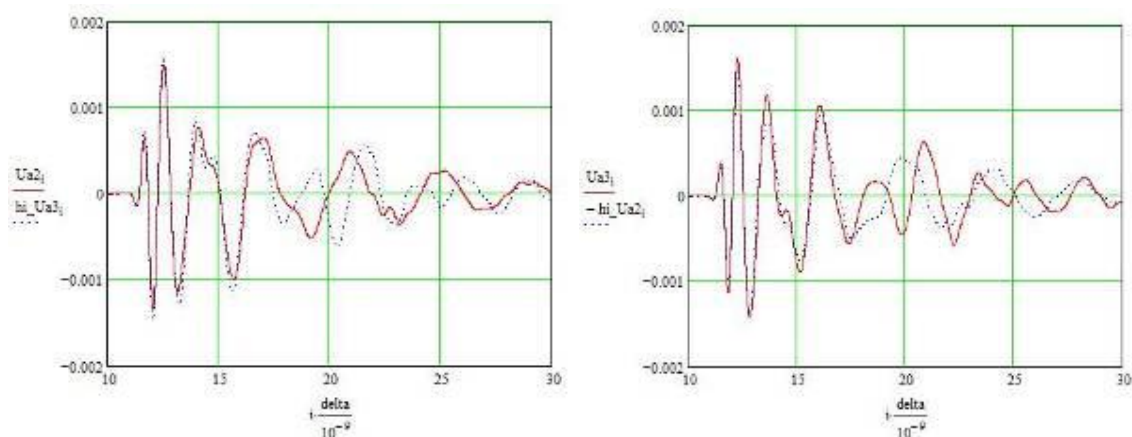
При возбуждении передающей антенны 2 сверхкоротким импульсом на выходах антенн 1 и 3 появляются квадратурные сигналы, отраженные от прямоугольной пластины (рис.6). Для расчета огибающей радиоимпульса сигнала, принимаемого антеннами круговой поляризации, можно воспользоваться формулой:

$$Ua(t) = \sqrt{[Ua2(t)]^2 + [Ua3(t)]^2}, \quad (4)$$

где:  $Ua2(t)$  и  $Ua3(t)$  квадратурные компоненты радиоимпульса, принимаемые антеннами круговой поляризации 2 и 3.



**Рис. 5. Антенны круговой поляризации в среде XFDTD**  
**1 – передающая антенна круговой поляризации левого вращения,**  
**2,3 – приемные антенны круговой поляризации правого вращения,**  
**4 – радиолокационный отражатель**



**Рис. 6. Сигнал на выходе квадратурных спиральных антенн**  
**Ua2** - сигнал на выходе приемной антенны 2,  
**Ua3** - сигнал на выходе приемной антенны 3,  
**hi\_Ua2** - преобразование Гильберта сигнала Ua2,  
**hi\_Ua3** - преобразование Гильберта сигнала Ua3

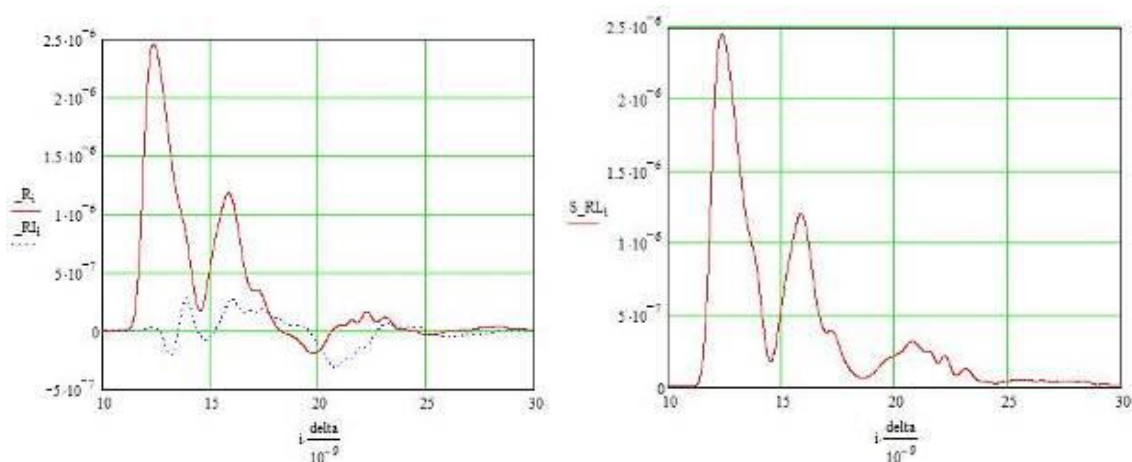
Мощность сигнала отраженного целью при ее облучении электромагнитным импульсом круговой поляризации правого вращения и приеме на круговой поляризации левого вращения определится как элемент ПМР цели (1):

$$|S_{RL}(t)|^2 = \frac{[Ua2(t)]^2 + [Ua3(t)]^2}{Ra}, \quad (5)$$

где  $Ra$  - входное сопротивление антенны.

Вследствие не идеальности характеристик спиральной антенны круговой поляризации при приеме сверхкороткого импульса сигналы на выходе антенн 2 и 3

отличаются от квадратурных компонент, полученных с помощью преобразования Гильберта. Автодинное преобразование по формуле (3) дает огибающую сигнала элемента  $S_{RL}(t)$  ПМР цели (рис.7).



**Рис.7. Огибающая сигнала элемента  $S_{RL}(t)$  матрицы рассеяния цели**

Аналогичным образом можно получить огибающую сигнала для других элементов ПМР цели (1).

Для измерения квадратурных компонент сигнала ПМР цели в базисе круговых поляризаций необходимо иметь два комплекта квадратурных антенн круговой поляризации способных излучать и принимать сверхкороткие импульсы.

Автодинное преобразование сигналов с выходов квадратурных антенн по формуле (3) дает возможность получить огибающую сигнала элемента ПМР цели (1) в зависимости от времени. При этом оценивается амплитуда и мощность сигнала принимаемая квадратурными антеннами круговой поляризации на заданном виде поляризации излучения и приема.

Взаимное автодинное преобразование (3) элементов ПМР (1) относительно элемента  $S_{LL}(t)$  позволяет получить огибающую элемента матрицы рассеяния в зависимости от времени и значение относительной фазы, как отражательной характеристики цели на заданном виде поляризации излучения и приема.

### Литература

1. Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. Книга 2. Радиолокационная поляриметрия. - М.: Радиотехника, 2007.
2. Кюн Р. Микроволновые антенны. – Л.: Судостроение, 1967.